



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Título del proyecto:

MULTIPLEXACIÓN DE SENSORES REMOTOS MEDIANTE
ESTRUCTURAS LÁSER DE FIBRA ÓPTICA

Daniel Leandro González

Manuel López-Amo Sainz

Pamplona, 24/11/10

Agradecimientos

Me gustaría mostrar mi agradecimiento a todas las personas que han colaborado de una u otra manera en la realización del proyecto. En primer lugar a Manuel López-Amo por su confianza y sacar siempre un momento para cualquier duda.

También me gustaría dar las gracias a todos los compañeros del laboratorio, Mikel Bravo, Sergio, Ángel, Ander... por la ayuda desinteresada que me han prestado, así como por animar las jornadas de laboratorio, que no han sido pocas. En particular quiero agradecer a Montse su confianza, paciencia y apoyo desde el primer día hasta el último, porque con una compañera así todo resulta más fácil.

En general, a todo el grupo de Fotónica, porque el trabajo de este PFC no es sólo mío sino que es fruto de las ideas y trabajo de más personas. En particular quiero agradecer a Alayn y Mikel Sagües su tiempo, ideas y explicaciones.

Este proyecto a su vez representa el fin de la carrera, por eso quiero aprovechar también para agradecer la ayuda a todos los compañeros de la carrera, especialmente a Fernando, por servirme de guía.

En especial quiero agradecer a Zuriñe su apoyo incondicional y su paciencia todo este tiempo así como a mi hermano y a mis padres, porque sin su apoyo hoy no estaría escribiendo esto.

Índice

Sección I Fundamentos teóricos 16

CAPÍTULO I Conceptos teóricos generales 18

1.1. Introducción	20
1.2. Amplificación óptica	20
1.2.1. Efecto láser	20
1.2.2. Amplificadores de fibra copada con Erblio	22
1.2.3. Amplificación Raman	31
1.3. Dispersión Brillouin	37
1.3.1. Introducción	37
1.3.2. Dispersión Brillouin estimulada en fibras ópticas	37
1.4. Láseres de fibra	39
1.4.1. Introducción	39
1.4.2. Cavidad Fabry-Perot	40
1.4.3. Láseres de fibra dopada con Erblio con configuración en anillo.....	41
1.5. Acoplador direccional	42
1.6. Redes de difracción de Bragg.....	45
1.7. Aislador óptico	53
1.8. Multiplexor en longitud de onda	53
1.9. Atenuadores de curvatura.....	54
1.10. Circuladores	54

Sección II Red de monitorización remota con multiplexación de sensores utilizando amplificación Raman y Brillouin..... 58

CAPÍTULO II Descripción de la red de monitorización remota con multiplexación de sensores utilizando amplificación Raman y Brillouin..... 60

2.1. Introducción	62
2.2. Estudio preliminar	63
2.2.1. Montaje inicial	64
2.2.2. Modo de operación del montaje inicial.....	66
2.3. Heterodinaje con Stokes y montaje final.....	69

2.3.1.	Heterodinaje con Stokes	69
2.3.2.	Mejora de la SNR	71
2.3.3.	Montaje final.....	73
CAPÍTULO III Resultados experimentales del sistema de monitorización remoto a 100 km.		76
3.1.	Introducción	78
3.2.	Estudio del sistema según la potencia recirculada en el espejo.	79
3.2.1.	Recirculación del 5%	79
3.2.2.	Recirculación del 50%	81
3.2.3.	Recirculación del 95%	81
3.3.	Proceso de medida y simulación del receptor	82
3.3.1.	Proceso de medida	82
3.3.2.	Software en Labview	83
3.3.3.	Configuración del analizador de espectros eléctrico (ESA)	83
3.3.4.	Configuración del láser sintonizable.....	84
3.4.	Multiplexación de sensores	87
3.4.1.	Configuración en paralelo.....	87
3.4.2.	Configuración en serie	88
3.5.	Optimización del sistema	89
3.5.1.	Limpieza y optimización física del montaje	89
3.5.2.	Ajuste del control de polarización.	89
3.5.3.	Ajuste de la potencia de bombeo Raman y potencia de LS.....	90
3.5.4.	Ajuste de los parámetros del barrido (<i>dwell time</i> y paso).....	92
3.6.	Comprobación del sistema como sensor de temperatura	93
3.7.	Comparación con el método de interrogación típico por barrido.....	97
3.8.	Breve resumen y conclusiones	99
CAPÍTULO IV Resultados experimentales del sistema de monitorización remoto a 150 km.		102
4.1.	Introducción	104
4.2.	Influencia del aumento de potencia de bombeo Raman.....	105
4.3.	Influencia de la presencia del láser sintonizable	107
4.4.	Modificación del espectro de ganancia Raman.....	108
4.4.1.	Modificación del espectro introduciendo un LPG.....	109

4.4.2.	Modificación del espectro introduciendo un FBG sintonizable	110
4.5.	Aumento de la ganancia sin aumentar el bombeo Raman	110
4.5.1.	Aumento de la ganancia mediante el ajuste del sistema.....	110
4.5.2.	Modificación del espejo para respuesta selectiva	112
4.5.3.	Reinserción del bombeo Raman	114
4.5.4.	Inclusión de amplificación con Erblio	114
4.6.	Breve resumen y conclusiones	118
CAPÍTULO V Resultados experimentales del sistema de monitorización remoto con amplificación de fibra dopada con Erblio.		120
5.1.	Introducción	122
5.2.	Análisis del montaje.....	123
5.3.	Influencia en el sistema de un amplificador de fibra dopada con Erblio (EDFA)	124
5.3.1.	Análisis de la atenuación del EDFA	124
5.3.2.	Análisis del sistema para 125 km y EDFA en el espejo	125
5.4.	Análisis del sistema incluyendo secciones de fibra dopada con Erblio	127
5.4.1.	Análisis del sistema con 125 km y 1 m de fibra dopada con Erblio (Er 80) en el km 50.	128
5.4.2.	Análisis del sistema con 125 km y 1 m de fibra dopada con Erblio (Er 80) en el km 75.	130
5.4.3.	Análisis del sistema con 125 km y 1 m de fibra dopada con Erblio (Er 80) en el km 25.	132
5.4.4.	Análisis del sistema con 155 km y 7 m de fibra dopada con Erblio 30 en el km 55	133
5.5.	Ajuste de la red de monitorización remota para dos sensores a 155 km utilizando amplificación Raman, Brillouin y de fibra dopada con Erblio.....	134
5.5.1.	Inestabilidad en potencia	134
5.5.2.	Generación de emisión láser espontánea en longitudes de onda indeseadas.....	135
5.5.3.	Dependencia de la polarización	137
5.6.	Montaje final para 155 km y comprobación del sistema como sensor de temperatura	138
5.7.	Resumen, conclusiones y futuras líneas de investigación.....	140

Sección III Láser en anillo de fibra dopada con erbio para operación monomodo en doble longitud de onda 142

CAPÍTULO VI Descripción del láser en anillo de fibra dopada con Erblio para operación monomodo en doble longitud de onda 144

6.1. Introducción	146
6.2. Estudio preliminar	146
6.3. Adaptación y réplica del montaje.....	148

CAPÍTULO VII Resultados experimentales del láser en anillo de fibra dopada con Erblio para operación monomodo en doble longitud de onda 152

7.1. Introducción	154
7.2. Análisis del montaje.....	154
7.2.1. Línea de emisión monomodo y distancia intermodal	155
7.2.2. Implicaciones del heterodinaje.	156
7.2.3. Saltos frecuenciales.....	157
7.3. Batería de pruebas	159
7.3.1. Prueba 1: Láser sintonizable centrado en λ_2	159
7.3.2. Prueba 2: Láser sintonizable centrado en λ_1	159
7.3.3. Prueba 3: Láser sintonizable centrado en λ_2 aumentando la potencia de ecualización	160
7.3.4. Prueba 4: Láser sintonizable centrado en λ_1 aumentando la potencia de ecualización	160
7.3.5. Prueba 5: Cambiar λ_2 por un FBG más cercano en longitud de onda (Láser sintonizable centrado en λ_1)	161
7.3.6. Prueba 6: Cambiar λ_2 por un FBG más cercano en longitud de onda (Láser sintonizable centrado en λ_2)	161
7.3.7. Prueba 7: Sustituir FBG de λ_2 por el láser sintonizable en 1539.8nm (observamos λ_1)	162
7.3.8. Prueba 8: Sustituir FBG de λ_2 por el láser sintonizable en 1552.5nm (observamos λ_1)	162
7.4. Análisis de resultados y conclusiones	163
7.4.1. Igualdad de potencia en las líneas de emisión	163
7.4.2. Sustitución de una línea de emisión por un láser sintonizable.....	163
7.4.3. Independencia de la separación entre los FBG	164
7.4.4. Conclusiones	164

CAPÍTULO VIII Nuevas topologías basadas en el láser en anillo de fibra dopada con Erbio para operación monomodo en doble longitud de onda.....	166
8.1. Introducción	168
8.2. Inclusión en el sistema de un EDFA	169
8.3. Montaje en paralelo	170
8.4. Montaje en serie	171
8.5. Sustitución por ganancia Raman	172
8.6. Conclusiones	173
Conclusiones del proyecto	174
Material utilizado	176
Estudio económico.....	194
Bibliografía	200
ANEXO 1 Software de medida en Labview	206
ANEXO 2 Publicaciones.....	216

Índice de figuras

Figura 1.1: Fenómeno de emisión espontánea.....	21
Figura 1.2: Fenómeno de absorción.	21
Figura 1.3: Fenómeno de emisión estimulada.	21
Figura 1.4: Niveles de energía del Erbio	23
Figura 1.5. Fenómenos de iteración presentes en la fibra óptica.....	24
Figura 1.6. Esquema de amplificación de tres niveles	25
Figura 1.7. Espectros de absorción y fluorescencia del erbio	27
Figura 1.8. Esquema de amplificación bombeo en 1480nm.....	28
Figura 1.9: Efecto Raman de forma estimulada.	31
Figura 1.10: Perfil de ganancia Raman en sílice para una única λ de bombeo	31
Figura 1.11: Amplificación Raman en el interior de la fibra.....	32
Figura 1.12: Ruido ASS añadido a una señal	33
Figura 1.13: Curva de ganancia Raman indicando las longitudes de onda de bombeo y la de ganancia máxima.	34
Figura 1.14: Perfil de ganancia Raman al introducir varias longitudes de onda de bombeo.	34
Figura 1.15: Ganancia Raman frente a la distancia	36
Figura 1.16: Estructura básica de un láser de fibra.....	40
Figura 1.17: Esquema de un láser de anillo de fibra dopada con erbio	41
Figura 1.18: Principio de campo evanescente en un acoplador direccional	43
Figura 1.19: Ilustración del concepto de Red de Difracción y su función óptica	45
Figura 1.20: Forma de variación del índice de refracción en las FBG uniformes constantes	49
Figura 1.21: Espectro en reflexión de una FBG uniforme	49
Figura 1.22: Forma de la variación del índice de refracción en las redes de difracción Bragg uniformes apodizadas	50
Figura 1.23: Espectro en reflexión de una FBG uniforme apodizada	50
Figura 1.26: Módulo de la respuesta de una red de difracción uniforme	51
Figura 1.27: Módulo de la respuestas de redes de difracción con distintas funciones de suavizado	52
Figura 1.28: Esquema general del WDM	53
Figura 1.29: Esquema básico de un circulador.....	55
Figura 1.30: Esquema de rotor Faraday.....	56
Figura 2.1. Montaje inicial	64
Figura 2.2. Esquema de multiplexación de FBGs en serie.....	65
Figura 2.3. Sensores en serie emitiendo sin ecualización.....	65
Figura 2.4. Multiplexación de FBGs en paralelo con atenuadores para ecualización....	65
Figura 2.5. Esquema del funcionamiento de un circulador como espejo con un acoplador 95:5 utilizado para extraer la señal de muestra.....	67

Figura 2.6. (a) Espectro en el OSA con la variación de potencia del LS dentro o fuera de la longitud de onda del <i>grating</i> ; (b) La diferencia entre las ondas de Stokes dentro y fuera del FBG nos da la medida.	68
Figura 2.7. Trazas en el ESA del batido obtenido en cuatro sensores de diferentes longitudes de onda.	70
Figura 2.8. (a) Traza del OSA de cómo tanto la onda de Stokes como el LS aumentan su potencia en el <i>grating</i> ; (b) Imagen en el ESA de la señal resultante del batido según esté dentro o fuera del FBG.	70
Figura 2.9. Ejemplo de cómo el ruido del fotodetector enmascara a la señal resultante del batido.	72
Figura 2.10. Comparación de las SNR del sistema sin utilizar acoplo del LS a la entrada del ESA (a) o utilizándolo (b).	73
Figura 2.11. Montaje final	74
Figura 3.1. Montaje inicial con control de polarización y atenuador variable.	79
Figura 3.2. Montaje para recirculación de un 5% de la potencia.	80
Figura 3.3. Mediciones en OSA (a) y ESA (b) para recirculación del 5%	80
Figura 3.4. Montaje para recirculación de un 50% de la potencia	81
Figura 3.5. Medidas en OSA (a) y ESA (b) para recirculación del 5%	81
Figura 3.6. Montaje para recirculación de un 50% de la potencia	82
Figura 3.7. Esquema paso a paso del proceso de medida.....	83
Figura 3.8. Prueba para los diferentes tipos de promediado.....	84
Figura 3.9. Trazas obtenidas según la variación del <i>dwell time</i> y el <i>step</i>	85
Figura 3.10. Proceso de generación de la medida.	86
Figura 3.11. Esquema del montaje para cuatro sensores en paralelo.	87
Figura 3.12. Esquema con multiplexación en serie.	88
Figura 3.13. Barrido del esquema con cuatro sensores en serie.	88
Figura 3.14. Barrido para variación de bombeo sin variar la potencia del LS.	90
Figura 3.15. Barrido para diferentes potencias de bombeo (a) con detalles del pico del sensor situado en 1549nm (b) y del perfil de ruido (c).....	91
Figura 3.16. Barrido para diferentes configuraciones de barrido (a) con detalles del pico del sensor situado en 1545nm (b) y del perfil de ruido (c).....	92
Figura 3.17. Primer barrido de temperatura	93
Figura 3.18. Gráfica de desplazamiento de la longitud de onda frente a la temperatura del primer barrido junto con la tabla de valores de la recta de ajuste.....	94
Figura 3.19. Segundo barrido de temperatura	95
Figura 3.20. Gráfica de desplazamiento de la longitud de onda frente a la temperatura del segundo barrido junto con la tabla de valores de la recta de ajuste.....	96
Figura 3.21. Esquema del montaje para el método de interrogación tradicional.	97
Figura 3.22. Resultado de la interrogación tradicional para un bombeo de 0.7W.	97
Figura 3.23. Resultado de la interrogación tradicional para un bombeo de 0.8W.	98
Figura 3.24. Proceso de medida, con los FBG localizados sin conectar el LS (a), con éste situado en el <i>grating</i> (b), y con el LS fuera del FBG.	100
Figura 3.25. Resultado de la interrogación mediante el nuevo método	100

Figura 3.26. Ajuste lineal de las medidas de temperatura	101
Figura 4.1. Montaje inicial para 150 km.	104
Figura 4.2. Espectro visto en OSA para un bombeo Raman de 1.1 W.....	105
Figura 4.3. Comparativa del efecto del aumento de la potencia de bombeo Raman entre 1.1 y 1.3 W en (a) y del sistema con y sin FBG para el mismo bombeo en (b)	106
Figura 4.4. Comparativa del efecto del aumento de la potencia de bombeo Raman entre 1.3 y 1.4 W	107
Figura 4.5. Espectro en el OSA del sistema con o sin LS.	107
Figura 4.6. Espectro con LS situado o no en el sensor.....	108
Figura 4.7. (a) Montaje con LPG. (b) Espectro del sistema con o sin LPG introducido en el espejo.	109
Figura 4.8. Montaje con un FBG sintonizable en el espejo.....	110
Figura 4.9. Espectro del sistema tras realizar las nuevas soldaduras	111
Figura 4.10. Espectro del bombeo Raman normalizado a 4 dBm de pico.	112
Figura 4.11. Espectro de la emisión láser indeseada.	112
Figura 4.12. Montaje sustituyendo el espejo por un FBG sintonizable.....	113
Figura 4.13. Barrido del sensor para el sistema con espejo selectivo.	113
Figura 4.14. Montaje para reinserción del bombeo Raman.....	114
Figura 4.15. Montaje con el EDFA introducido en el espejo.	114
Figura 4.16. Barrido en el ESA del sensor FBG colocado en 1545 nm.	115
Figura 4.17. Espectro de ganancia con o sin el EDFA en el circulador	116
Figura 4.18. Espectro de ganancia con o sin el EDFA en el circulador (bombeo 1.45 W)	116
Figura 4.19. Medida de los 4 sensores para bombeo de 1.25 W	117
Figura 4.20. Medida de dos sensores en serie para un bombeo de 1.27 W	118
Figura 5.1. Esquema inicial del montaje para 125 km	123
Figura 5.2. Resultado de las medidas para 125 km	123
Figura 5.3. Atenuación del EDFA en función de la longitud de onda	125
Figura 5.4. Montaje de 125 km con EDFA en el espejo	125
Figura 5.5. Medidas para 125 km con y sin EDFA de todo el espectro (a) o en detalle de la zona de trabajo (b)	126
Figura 5.6. Medidas para 125 km con EDFA a diferentes potencias de todo el espectro (a) o en detalle de la zona de trabajo (b).....	126
Figura 5.7. Detalle de la zona de trabajo para el caso sin EDFA y con EDFA a 3 mW	127
Figura 5.8. Montaje con 1 m de fibra fuertemente dopada tras 50 km de SMF.....	128
Figura 5.9. (a) Espectro en OSA para bombeos de 0.7 y 0.85 W frente al caso sin fibra dopada con Erblio con detalle de la zona de los sensores (b).....	128
Figura 5.10. Traza del OSA con los sensores conectados (recuadrados)	129
Figura 5.11. Medidas para el sensor de 1549.5 (a) y 1541.4 nm (b)	129
Figura 5.12. Montaje con 1 m de fibra fuertemente dopada tras 75 km de SMF.....	130
Figura 5.13. Traza del OSA con los sensores conectados (a) y traza del espectro completo (b).....	131

Figura 5.14. Montaje con 1 m de fibra fuertemente dopada tras 25 km de SMF.....	132
Figura 5.15. Espectro del montaje con fibra dopada tras 25 km de SMF para potencia de bombeo Raman de 0.70 (a) y 0.35 W (b)	132
Figura 5.16. Montaje con 1 m de fibra fuertemente dopada (Er30) tras 55 km de SMF	133
Figura 5.17. Medidas del sensor situado en 1555 nm sin (a) y con promediado.	134
Figura 5.18. Comparación de diferentes tipos de promediados.	135
Figura 5.19. Efecto de emisión láser indeseada en 1555 nm.....	135
Figura 5.20. Montaje para 155km con BPF sintonizable.	136
Figura 5.21. (a) Espectro de ganancia con o sin LS sobre el sensor visto en el OSA. (b) Medida del sistema con BPF en el montaje. (c) Medida del sistema con BPF en el montaje.	137
Figura 5.22. Medidas de interrogación de dos sensores con y sin <i>polarization scrambler</i> respectivamente.	138
Figura 5.23. Montaje final para dos sensores situados a 155 km	139
Figura 5.24. Ajuste lineal del barrido de temperatura y tabla con los valores del ajuste	139
Figura 5.25. Medida de dos sensores para una distancia de 155 km.	141
Figura 6.1. Esquema original y funcionamiento del láser en configuración de anillo.	147
Figura 6.2. Montaje del láser en anillo con medición mediante heterodinaje	150
Figura 7.1. Montaje réplica de prueba.	154
Figura 7.2. Líneas de emisión de los FBG sin ecualizar vistas en el OSA.....	155
Figura 7.3. Traza instantánea del batido del láser sintonizable con el FBG situado en 1538 nm con el sistema sin ecualizar en potencia (resolución 100 kHz).	156
Figura 7.4. Representación esquemática del proceso de heterodinaje	157
Figura 7.5. Traza del ESA con <i>max hold</i> activado durante 5 segundos.	158
Figura 7.6. Variación del montaje sustituyendo el segundo FBG por un LS	162
Figura 8.1. Montaje con un EDFA en vez del bombeo de fibra dopada con Erbio.....	169
Figura 8.2. Modificación del montaje en paralelo.....	171
Figura 8.3. Modificación del montaje en serie	171
Figura 8.4. Modificación del montaje con ganancia Raman	172

Introducción

Actualmente en muchas ocasiones son necesarios el control y medida de multitud de parámetros físicos, como la temperatura, presión, humedad, vibraciones, etc. Para esto se necesitan dispositivos sensores que permitan traducir las variaciones físicas en señales que puedan ser tratadas automáticamente.

Desde hace tres décadas los sensores ópticos se han mostrado como una buena solución y han gozado de un gran desarrollo. Sus características de bajo peso y tamaño, robustez, bajo coste, y su posibilidad de trabajar en medios hostiles hacen que su uso sea prácticamente imprescindible en muchas aplicaciones con entornos inflamables, o con interferencias eléctricas o magnéticas. En estas situaciones, un sensor eléctrico convencional no es capaz de trabajar con seguridad. Algunos casos donde se utilizan este tipo de sensores son: la monitorización de gaseoductos, presas, tecnología aeroespacial o detección de tsunamis. En este último caso además es importante que la red de sensores pueda monitorizarse a larga distancia y de manera remota, es decir, sin ningún tipo de alimentación en el sensor. Una posible solución para este tipo de aplicaciones se verá en la segunda sección del proyecto.

Por otra parte, en ciertas aplicaciones como en los sistemas con multiplexación en longitud de onda, el desarrollo de láseres que emitan en varias longitudes de onda simultáneamente presenta grandes ventajas. Una de las soluciones que se plantea para este tipo de sistemas en tercera ventana de comunicaciones es la utilización de configuraciones en anillo en láseres de fibra dopada con erbio. Además las ventajas de estos sistemas aumentan si los láseres generados operan en régimen monomodo, con aplicaciones como caracterización de fibra óptica o test de instrumentos.

Sin embargo, la utilización de la amplificación con fibra dopada con erbio tiene también sus desventajas. Por este motivo, también es de gran interés utilizar otro tipo de amplificación como puede ser Raman cuya ganancia es distribuida a lo largo de la fibra, no como la proporcionada por el erbio. Esto la hace especialmente útil para la larga distancia ya que su medio activo es la propia fibra óptica.

Todo lo comentado anteriormente son las bases de este proyecto final de carrera en el que se desarrolla en primer lugar una red de sensores remota para larga distancia utilizando ganancia Raman y Brillouin. El sistema se basa en un láser de fibra con sensores FBG remotos, realizándose la medida en el medio eléctrico mediante heterodinaje. Se alcanzan inicialmente 100 km con cuatro sensores conectados en serie. Esa distancia finalmente se aumenta hasta los 155 km donde también se incluye amplificación mediante fibra dopada con erbio. Todo este estudio desemboca en el diseño de un sistema de medida y el estudio de los diferentes problemas que surgen en la interrogación a larga distancia.

En la segunda parte del proyecto se estudia un láser de fibra de dos líneas en régimen monomodo con configuración en anillo y amplificación mediante fibra dopada con erbio. Se basa en un montaje ya conocido, sobre el cual se realizan numerosas pruebas, y modificaciones. Los resultados obtenidos se estudian y analizan para buscar las causas de la operación en régimen monomodo del sistema.

Finalmente se realiza un estudio económico del proyecto final de carrera y se muestran las principales características del material utilizado. En el anexo se incluye además una breve explicación del software diseñado para el nuevo sistema de medida de la segunda sección y finalmente se adjuntan las publicaciones obtenidas.

Sección I

Fundamentos teóricos

CAPÍTULO I

Conceptos teóricos generales

1.1. Introducción

En este capítulo se describe brevemente el efecto de amplificación óptica en general y de la emisión láser. De forma más detallada se explicará la amplificación en las fibras de sílice dopada con erbio, así como la amplificación Raman y la dispersión Brillouin. También se realiza un resumen del funcionamiento y principales parámetros de algunos de los dispositivos utilizados en el montaje, como redes de difracción, acopladores, multiplexores y circuladores.

1.2. Amplificación óptica

La amplificación óptica es el proceso mediante el cual se incrementa la potencia de una señal óptica manteniendo el resto de sus características sin necesidad de reconversiones opto-electrónicas. Este efecto permite la compensación no solo de las pérdidas introducidas por la fibra en enlaces de larga distancia y gran capacidad, sino también de las debidas a otros elementos como los componentes pasivos que realizan tareas de división de señal.

La amplificación óptica puede conseguirse mediante inversión de población en un medio con bandas de energía intrínsecas, o bien mediante *scattering* en un medio no lineal. Al primer grupo pertenecen los amplificadores de semiconductor y los amplificadores de fibra dopada, mientras que al segundo pertenecen los amplificadores de efecto Raman y Brillouin.

1.2.1. Efecto láser

En este apartado trataremos el efecto láser (*Light Amplification through Stimulated Emission of Radiation*). Para tratar de comprender principio de funcionamiento del amplificador óptico es necesario recordar los fundamentos de la interacción radiación-materia.

Consideremos un átomo con dos niveles de energía, E_1 y E_2 . Nos interesan las posibles formas de interacción entre el átomo y los fotones de una radiación de frecuencia ν , tal que $h\nu = E_2 - E_1$, es decir cuya energía es igual a la diferencia de energía entre los dos niveles del átomo.

Las posibles formas de interacción son los procesos de emisión espontánea, absorción y emisión estimulada.

Emisión espontánea:

Si el átomo se encuentra inicialmente en el nivel de energía superior, puede pasar espontáneamente al nivel inferior liberando su energía en forma de fotón. Dicho fotón tendrá una energía ($h\nu$) igual a la diferencia de energía entre los dos niveles del átomo.

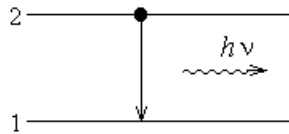


Figura 1.1: Fenómeno de emisión espontánea.

Absorción:

Si el átomo se encuentra inicialmente en el nivel de energía superior e incide sobre él un fotón, éste puede ser absorbido por el material promocionando el átomo al nivel de energía superior. La absorción es una transición inducida por el fotón y que solamente puede producirse en presencia de éste.

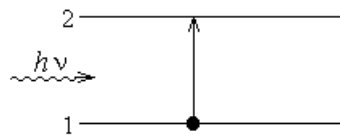


Figura 1.2: Fenómeno de absorción.

Emisión estimulada:

Si el átomo se encuentra inicialmente en el nivel de energía superior y sobre él incide un fotón, el átomo puede ser estimulado por dicho fotón y emitir otro fotón con la misma dirección y sentido que el primero. El nuevo fotón presenta la misma frecuencia y fase que el original. Este proceso es inverso al de absorción y, al igual que éste, viene inducido por la radiación incidente.

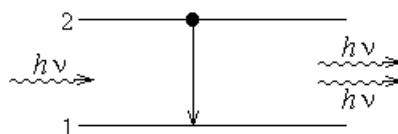


Figura 1.3: Fenómeno de emisión estimulada.

De estos tres procesos, los de absorción y emisión estimulada producen los fenómenos de atenuación y amplificación óptica. La emisión espontánea es la causante del ruido generado en los amplificadores ópticos.

Si los estados de energía no están degenerados, es decir, no hay varios estados del átomo con la misma energía, las probabilidades de absorción y de emisión estimulada son iguales y proporcionales a la intensidad de la radiación incidente. Dicha probabilidad viene expresada como $W_i = \Phi \cdot \sigma(\nu)$, donde Φ es la densidad de la radiación incidente (número fotones que atraviesa la unidad de área por unidad de tiempo) y $\sigma(\nu)$ es la sección eficaz (unidades de área).

La densidad de fotones absorbidos por unidad de tiempo es $N_1 W_i$, siendo N_1 el número de átomos por unidad de volumen que tienen electrón más externo en el orbital inferior de energía. Análogamente la densidad de fotones generados por emisión estimulada es $N_2 W_i$, siendo N_2 la densidad volumétrica de átomos que se encuentran en el nivel superior de energía. La densidad neta de fotones generados por unidad de tiempo es $(N_2 - N_1) W_i$. Cuando $N_2 > N_1$ el número de fotones generados supera al de fotones absorbidos y se consigue emisión o amplificación; por el contrario, cuando $N_2 < N_1$ el número de fotones absorbidos supera a los emitidos y se obtiene atenuación.

En condiciones de equilibrio térmico los átomos tienden a adquirir los estados energéticos de menor energía, lo que significa que $N_2 < N_1$ y que predomina la absorción, traduciéndose en la atenuación de la señal óptica. Para obtener un medio amplificador es necesario que el número de átomos presentes en el estado de energía superior sea mayor que los presentes en el estado inferior. Esta condición se conoce como inversión de población y el proceso por el que se consigue se denomina bombeo.

1.2.2. Amplificadores de fibra copada con Erbio

Los amplificadores de fibra dopada se obtienen al dopar el vidrio que constituye el núcleo de una fibra óptica con iones de materiales pertenecientes al grupo de las tierras raras (Er, Yb, Nd, Pr). El medio activo es el propio núcleo de la fibra óptica y la inversión de población se obtiene a través del bombeo óptico de dichos iones, que los traslada de un estado fundamental a otro excitado. La principal ventaja de este tipo de amplificadores es que son compatibles con la fibra óptica que constituye el medio de transmisión en los sistemas de comunicación ópticos.

El amplificador de fibra dopada con erbio es el más empleado de este tipo de dispositivos debido a que el diagrama de niveles de energía del erbio permite amplificar señales en la tercera ventana de comunicaciones ópticas.

1.2.2.1. Niveles energéticos del erbio

En la representación esquemática de los niveles de energía del ion Er^{3+} se puede observar las posibles transiciones de absorción así como las transiciones radiantes, estando las longitudes de onda de las mismas expresadas en nanómetros. La transición relevante en comunicaciones ópticas es la que se origina en el nivel $4I_{13/2}$ y finaliza en el nivel $4I_{15/2}$, que corresponde a una longitud de onda de aproximadamente 1550 nm. Para provocar la inversión de población necesaria para producir la amplificación óptica podemos bombear los iones de erbio utilizando diferentes longitudes de onda situadas en el visible y el infrarrojo cercano. La transición de absorción cercana a 1480 nm se justifica al considerar la subestructura de niveles Stark de los niveles $4I_{13/2}$ y $4I_{15/2}$. El efecto Stark consiste en la degeneración de niveles de energía y se produce debido al campo eléctrico local creado por los átomos del entorno del ion de erbio cuando este se encuentra en un medio material.

Cuando el ion de Er^{3+} se encuentra en un vidrio, el desdoblamiento de los niveles de energía se produce en el máximo número de subniveles posibles. Concretamente, los niveles fundamental ($4I_{15/2}$) y excitado ($4I_{13/2}$) se desdoblan en 8 y 7 subniveles, respectivamente. De esta forma podemos considerar que cada nivel se comporta como una banda de energía.

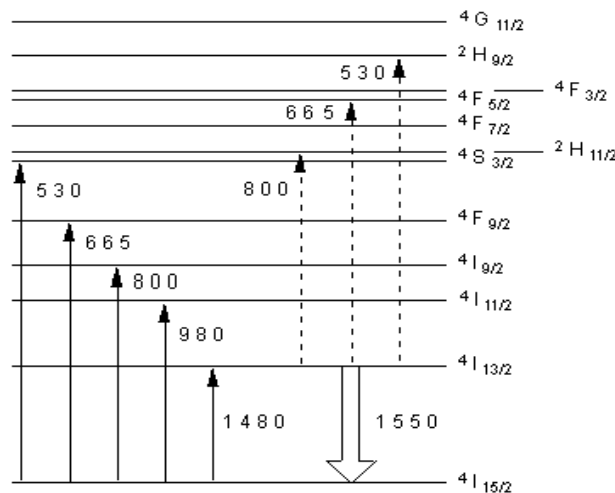


Figura 1.4: Niveles de energía del Erbio

1.2.2.2. Efecto láser en la fibra dopada con erbio

En una primera aproximación a los fenómenos presentes en la amplificación óptica consideramos el sistema simplificado de tres niveles de energía del ion de erbio.

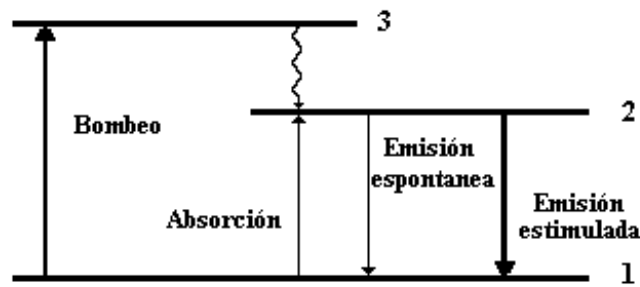


Figura 1.5. Fenómenos de iteración presentes en la fibra óptica

El nivel 1 es el nivel fundamental, el 2 es el nivel metaestable, que se caracteriza por un tiempo de vida largo τ , y el nivel 3 es el nivel de bombeo. La transición láser de interés es la que tiene lugar entre los niveles 1 y 2.

Para conseguir la inversión de población entre los niveles 1 y 2, se utiliza un láser que emite a una longitud de onda igual a la diferencia de energía entre los niveles 1 y 3. Este láser, que se conoce como láser de bombeo, excita los iones desde el nivel 1 al 3 por absorción. El nivel 3 se caracteriza porque los electrones en él tienen un tiempo de vida medio muy corto, y además existe un mecanismo de transición de los electrones entre el nivel 3 y 2. Este decaimiento es no radiante, lo que significa que no se produce ningún fotón en dicho proceso, sino que la energía se libera en forma de fonón. Por el contrario, el nivel 2, se caracteriza por un tiempo de vida medio de los electrones en él mucho más largo ($\tau=10\sim12\text{ms}$), por lo que los electrones que decaen del nivel 3 se acumulan en el nivel 2, consiguiéndose el deseado efecto de inversión de población entre los niveles 1 y 2 con potencias de bombeo relativamente bajas.

Introduciendo potencia óptica de una frecuencia óptica correspondiente a la diferencia de energía entre los niveles metaestable y fundamental conseguimos que estos fotones exciten los electrones que se encuentran en el nivel 2 haciéndolos caer al nivel 1 por emisión estimulada, produciéndose fotones de las mismas características de los primeros y consiguiéndose la amplificación de la señal incidente.

El proceso de emisión espontánea también está presente constituyendo una fuente de ruido dado que es un proceso independiente de la señal incidente y los fotones generados se emiten en todas las direcciones de forma equiprobable. Los de mayor interés son aquéllos que se propagan en la misma dirección que la señal, tanto en el mismo sentido como en el contrario. Estos fotones de ruido se ven amplificados al propagarse a lo largo del medio activo dando origen a los ruidos FASE (*Forward Amplified Spontaneous Emission*), de igual sentido al de la señal, y BASE (*Backward Amplified Spontaneous Emission*), de sentido contrario.

Podemos expresar todo esto de una forma más cuantitativa.

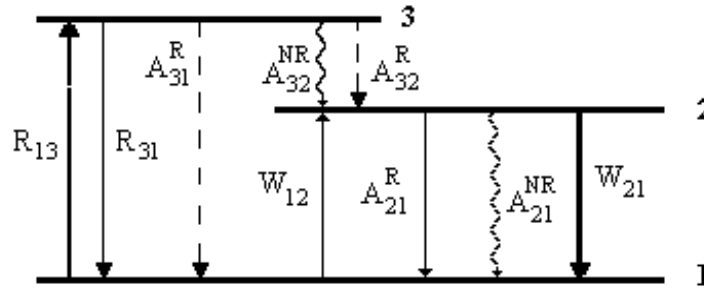


Figura 1.6. Esquema de amplificación de tres niveles

R_{13} representa el bombeo desde el nivel 1 al nivel 3, mientras que R_{31} corresponde a la emisión estimulada desde el nivel 3 al 1. Desde el estado excitado el decaimiento puede producirse de forma radiante ($A_3^R = A_{32}^R + A_{31}^R$) o no radiante (A_{32}^{NR}). El decaimiento espontáneo desde el nivel 3 se asume como predominantemente no radiante, es decir, $A_{32}^{NR} \gg A_3^R$. La absorción y la emisión estimulada entre los niveles 1 y 2 está representada por W_{12} y W_{21} , respectivamente.

El decaimiento espontáneo radiante y no radiante desde el estado excitado nivel 2 viene dado por $A_2 = A_{21}^R + A_{21}^{NR}$, donde $A_{21}^R = 1/\tau$, con τ el tiempo de vida de fluorescencia. Se asume que el decaimiento espontáneo es esencialmente radiante, es decir, $A_{21}^R \gg A_{21}^{NR}$.

Considerando la densidad de iones láser como ρ , y N_1 , N_2 y N_3 como las densidades fraccionales, o poblaciones, de átomos en los niveles de energía 1, 2 y 3, respectivamente, entonces, por definición:

$$N_1 + N_2 + N_3 = \rho$$

Escribiendo las ecuaciones que se corresponden con esas poblaciones:

$$\frac{dN_1}{dt} = -R_{13} \cdot N_1 + R_{31} \cdot N_3 - W_{12} \cdot N_1 + W_{21} \cdot N_2 + A_{21} \cdot N_2$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{12} \cdot N_1 - W_{21} \cdot N_2 - A_{21} \cdot N_2 + A_{32} \cdot N_3$$

$$\frac{dN_3}{dt} = R_{13} \cdot N_1 - R_{31} \cdot N_3 - A_{32} \cdot N_3$$

Consideramos el momento en el que se alcanza el estado de equilibrio, cuando las poblaciones son invariantes en el tiempo, es decir:

$$\frac{dN_i}{dt} = 0$$

Denominando $a=R_{31}+A_{32}$ y $b=W_{21}+A_{21}$, se obtiene:

$$\frac{dN_1}{dt} = -R_{13} \cdot N_1 + R_{31} \cdot N_3 - W_{12} \cdot N_1 + W_{21} \cdot N_2 + A_{21} \cdot N_2$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{12} \cdot N_1 - W_{21} \cdot N_2 - A_{21} \cdot N_2 + A_{32} \cdot N_3$$

$$\frac{dN_3}{dt} = R_{13} \cdot N_1 - R_{31} \cdot N_3 - A_{32} \cdot N_3$$

A partir de aquí y teniendo en consideración que el decaimiento no radiante A_{32} domina sobre R_{13} y R_{31} se llega a las siguientes expresiones para las poblaciones de los niveles de energía 1 y 2:

$$N_1 = \rho \frac{1 + W_{21}\tau}{1 + R\tau + W_{12}\tau + W_{21}\tau}$$

$$N_2 = \rho \frac{1 + W_{12}\tau}{1 + R\tau + W_{12}\tau + W_{21}\tau}$$

Con $R=R_{13}$. A partir del resultado podemos obtener la población del nivel de bombeo como:

$$N_3 = \rho - N_1 - N_2$$

Es decir, la población del nivel de bombeo es despreciable debido al decaimiento predominante no radiante hacia el nivel metaestable 2.

1.2.2.3. Absorción desde el estado excitado

El efecto de absorción desde el estado excitado, es un efecto no deseado del que se distinguen dos tipos según afecte al bombeo o a la señal. Consiste en la absorción de fotones de bombeo o señal que son excitados desde el nivel metaestable hasta alcanzar un cuarto nivel de energía superior. Ambos procesos, absorción de bombeo y de señal desde el estado excitado, se traducen en una excesiva pérdida de potencia, bien sea de bombeo o de señal, que reduce la ganancia de la fibra. En el caso de absorción de bombeo, parte de la potencia no produce inversión de población sino que se desperdicia

excitando iones del estado metaestable que rápidamente se relajarán de forma no radiante regresando nuevamente al estado metaestable.

Sin embargo, resultados experimentales han revelado que la absorción ESA es inexistente cerca de 980nm o 1480nm, que son las longitudes de onda más empleadas de entre las bandas posibles de bombeo para obtener el efecto láser, ya que son las más eficientes de las que pueden excitarse utilizando láseres de estado sólido.

1.2.2.4. Secciones eficaces (*Cross sections*)

En el comportamiento del sistema láser desempeñan una importante función tanto la sección eficaz de emisión estimulada desde el primer excitado como la sección eficaz de absorción desde el estado fundamental. La probabilidad de que ocurra una transición de los electrones entre niveles de energía depende de la longitud de onda del fotón incidente, y las secciones eficaces de emisión y absorción proporcionan el perfil de probabilidades de que se produzca absorción o emisión estimulada en función de la longitud de onda del fotón incidente. La región donde ambas secciones eficaces toman valores relevantes se extiende aproximadamente desde 1450nm hasta 1650nm. Aunque el perfil de las secciones eficaces varía con la composición del vidrio, la posición de los picos de dichos espectros apenas se modifica. Dichos picos se sitúan en torno a 1530nm.

El espectro de ganancia de esta transición viene dado por las secciones eficaces de absorción y emisión y por la inversión de población, por lo que su perfil no es plano en longitudes de onda.

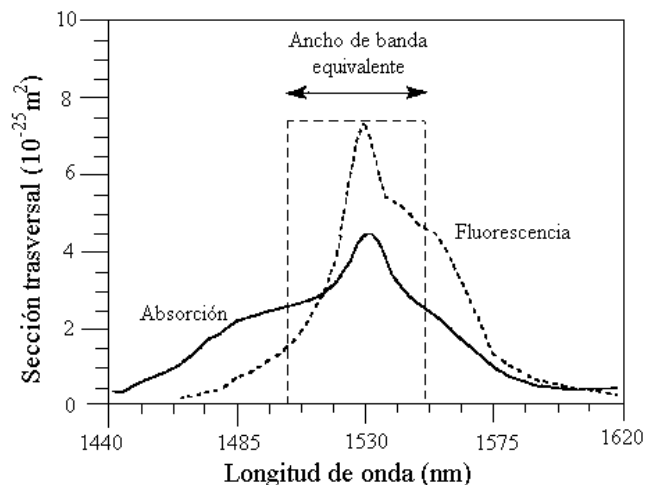


Figura 1.7. Espectros de absorción y fluorescencia del erbio

En la figura anterior se observa que en torno a los 1480nm la absorción supera a la emisión lo que hace que esta zona bombeo sea adecuada para conseguir poblar el estado excitado. Además, en esta longitud de onda puede considerarse inexistente el efecto de absorción desde el estado excitado. El inconveniente de utilizar esta banda como banda de bombeo es que no se puede conseguir una inversión de población completa debido a la existencia de emisión espontánea para esta longitud de onda. Este inconveniente desaparece si empleamos la banda de absorción de 980nm al ser la emisión despreciable debido al corto tiempo de vida media para el estado energético $4I_{11/2}$. Aunque en esta banda tampoco existe absorción de bombeo desde el estado excitado de la transición láser, sí la hay desde el nivel $4I_{11/2}$ hasta el nivel $4F_{7/2}$. Debido a que la población de este nivel decae rápidamente de forma no radiante, la absorción de bombeo desde este nivel sólo puede producirse con potencias de bombeo elevadas, superiores a 50 mW.

Si para provocar la inversión de población empleamos un láser de bombeo de 980nm, el esquema de bombeo es el correspondiente a uno de tres niveles como se ha descrito previamente. En el caso de utilizar un láser que emita a 1480, el sistema aparentemente responde a un sistema de dos niveles (Figura 1.). En principio la amplificación no sería posible en un sistema de este tipo, sin embargo puede producirse dado que lo que tenemos en realidad son bandas de energía.

Los subniveles de energía superiores del estado $4I_{13/2}$ actúan como nivel metaestable (3), y los subniveles inferiores de este mismo estado actúan como nivel intermedio (2). Esto hace que la emisión espontánea a la longitud de onda del bombeo se haga significativa, restando eficiencia al bombeo.

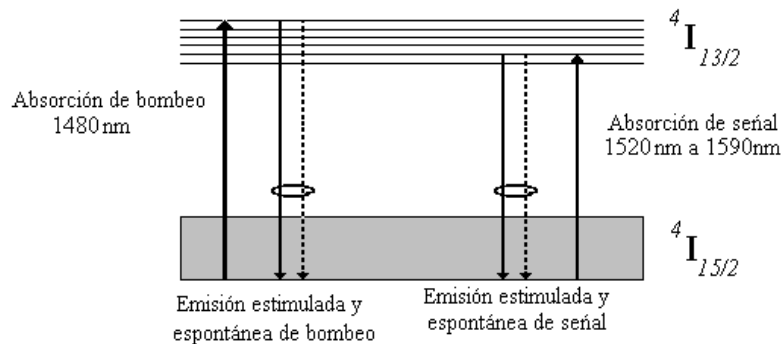


Figura 1.8. Esquema de amplificación bombeo en 1480nm

1.2.2.5. Saturación de la ganancia

La absorción del bombeo a lo largo de la fibra, la saturación de la ganancia producida por la señal incidente y la auto-saturación de la misma debido al ruido ASE, son factores que afectan a la ganancia de un medio amplificador. La absorción del bombeo se puede contrarrestar aumentando la potencia de bombeo inyectada.

Cuando la potencia de señal introducida es elevada puede llegar el momento en que la tasa de emisión estimulada iguale e incluso supere a la tasa de bombeo, produciéndose la saturación de la ganancia. Para evitar este efecto podemos recurrir al aumento de la potencia de bombeo o a la disminución del nivel de potencia de señal inyectada. En ese caso estaremos trabajando en *régimen no saturado o de pequeña señal*.

El ruido ASE aumenta linealmente con la ganancia y puede llegar el momento en que éste compita con la tasa de bombeo cuando trabajamos en régimen de alta ganancia e inversión de población completa. Esta competición se produce en zonas localizadas cerca del final o del inicio de la fibra, donde los ruidos FASE y BASE son mayores respectivamente. En estas zonas el medio inversor se reduce y la ganancia del amplificador se satura en ausencia de señal de entrada.

1.2.2.6. Competencia por la ganancia

La ganancia proporcionada por un determinado segmento de fibra amplificadora con una potencia de bombeo constante tiene que repartirse entre las longitudes de onda presentes a su entrada. Esto se debe a que los átomos de la capa superior, conseguidos por la inversión de población mediante la potencia de bombeo, han de ser compartidos por todas las señales incidentes.

Este efecto es importante en sistemas de múltiples canales y debe considerarse a la hora de introducir nuevos canales o de eliminar algunos de los ya existentes. El añadir nuevos canales implica la disminución de la ganancia de los ya existentes, lo que puede originar problemas en el balance de potencia del sistema y en la calidad de la señal resultante tras la detección. Al eliminar canales aumentamos la potencia de los restantes, lo que puede causar problemas de saturación del sistema de detección o de no linealidad de la fibra.

1.2.2.7. Ruido en los amplificadores ópticos

El ruido dominante generado por los amplificadores ópticos es el ruido debido a la emisión espontánea amplificada (ASE). El ruido espontáneo resultante puede considerarse como un proceso aleatorio en el que los eventos son pulsos infinitamente cortos distribuidos a lo largo del medio activo. Este proceso aleatorio está caracterizado por un ruido de espectro de potencia plano, cuya densidad espectral viene dada por

$$N_{ASE} = \chi n_{sp} (\gamma(v)-1) h v$$

Donde:

n_{sp} es el factor de inversión de población ($n_{sp}=N_2/(N_1 + N_2)$), con valores típicos entre 1.4 y 4 dependiendo de la cantidad de bombeo y de la longitud de onda ($n_{sp} \geq 1$ con $n_{sp}=1$ cuando se consigue inversión de población total),

h es la constante de Plank

χ es el factor de exceso de ruido ($\chi=1$ para los amplificadores de fibra dopada).

ν es la frecuencia óptica

$\gamma(\nu)$ es la ganancia del amplificador para cada frecuencia óptica.

Cuando la salida completa de un amplificador óptico (señal amplificada y ruido ASE) es detectada por un fotodiodo, han de considerarse tres ruidos: a los ruidos térmico y *shot* se añade el ruido de batido entre el ASE y la señal y entre ASE y ASE.

Un parámetro importante es la figura de ruido (“*noise figure*”). Este parámetro está definido como:

$$F = \frac{(S/N)_{in}}{(S/N)_{out}}$$

Siendo S/N la relación señal ruido, e *in* y *out* indican entrada y salida del amplificador.

Así pues, la figura de ruido valora la degradación que sufre la relación señal ruido en el proceso de amplificación óptica. Para los amplificadores de fibra dopada, dada una ganancia de señal mayor que la unidad, la figura de ruido viene dada por:

$$F \approx 2n_{sp} + \frac{n_{sp}^2 \Delta \nu}{\langle n_{in} \rangle}$$

donde $\Delta \nu$ es la anchura espectral óptica y $\langle n_{in} \rangle$ el número medio de fotones a la entrada. Para valores de $\langle n_{in} \rangle$ altos y $\Delta \nu$ bajos, la figura de ruido es $F \approx 2 n_{sp}$. En el caso ideal, $n_{sp}=1$, y $F = 2$ (3 dB).

La figura de ruido es menor cuando se bombea a 980nm, ya que entonces la influencia de la emisión estimulada a la longitud de onda de bombeo puede ser despreciada. La figura de ruido también se reduce en el caso de bombeo codireccional (bombeo y señal propagándose en el mismo sentido) frente al caso de bombeo contradiereccional (bombeo y señal con sentidos opuestos).

1.2.3. Amplificación Raman

1.2.3.1. Fundamentos de la amplificación Raman

La amplificación Raman está basada en la dispersión Raman. Un fotón incide sobre el material de la fibra óptica absorbiendo parte de la energía, lo que causa una vibración o rotación y provoca que la luz existente se radie en todas las direcciones. Esta luz radiada será de menor energía que la luz incidente y por tanto su longitud de onda será mayor, de modo que se trata de un efecto inelástico.

Para conseguir este efecto de forma estimulada se radian dos ondas incidentes, siendo una de ellas a la longitud de onda de Stokes. Se conoce como longitud de onda de Stokes a aquella longitud de onda de bombeo que produce amplificación en la longitud de onda de la otra onda incidente en el centro de dispersión. De este modo las señales radiadas al chocar con el centro de dispersión *scattering*, imperfecciones en la fibra, provocan que todas las ondas dispersadas estén en fase.

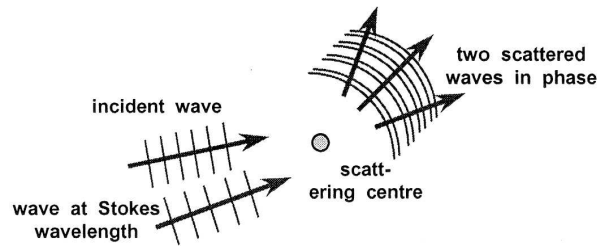


Figura 1.9: Efecto Raman de forma estimulada.

Este efecto de amplificación presenta una curva de ganancia característica como la ilustrada en la figura 1.10.

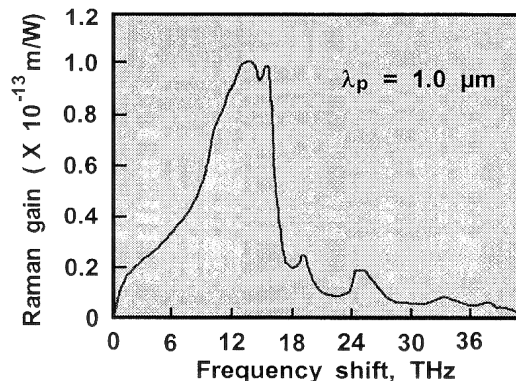


Figura 1.10: Perfil de ganancia Raman en sílice para una única λ de bombeo

Como se puede observar en la figura 1.10, el máximo de ganancia Raman se da a 13,2THz de distancia de la longitud de onda de bombeo, es decir, en torno a los 100nm

por encima de la longitud de bombeo para un bombeo a 1445nm. De este modo, con una elección apropiada de la longitud de onda del bombeo, se puede amplificar señales de cualquier longitud de onda. Esta curva de ganancia tiene una anchura espectral (BW_{FWHM}) de 17,5THz.

La señal y el bombeo se encuentran en el centro de dispersión, donde se generan fotones extra a la longitud de onda de la señal y que viajarán en fase con ésta, tanto en el sentido de la señal como en sentido contrario, este efecto es el que genera el ruido de “*backscattering*”. Al llegar al siguiente centro de dispersión, la señal con el fotón extra y el bombeo vuelven a generar otros nuevos fotones de longitud de onda la de la señal y en fase con ésta. A su vez algunos fotones se propagarán en sentido contrario, agregándose al ruido de “*backscattering*” ya existente. Y este proceso se repite continuamente. Cualquier pequeña discontinuidad de la fibra puede convertirse en un centro de dispersión.

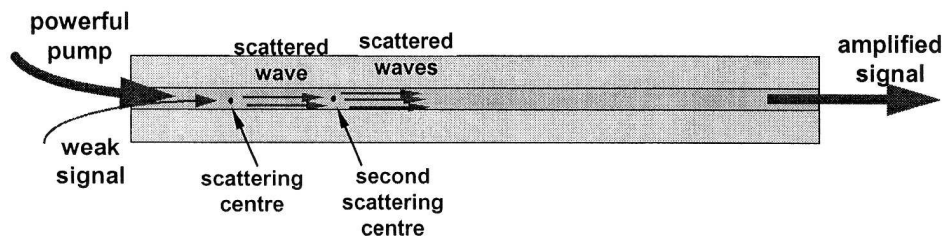


Figura 1.11: Amplificación Raman en el interior de la fibra

La ganancia Raman es máxima cuando la señal y el bombeo tienen polarizaciones paralelas, y es mínima, llegando incluso a anularse, cuando la polarización de ambas es ortogonal. Controlar la polarización a lo largo de toda la fibra es muy complicado, por lo que se suele optar por introducir a ambas señales una polarización aleatoria, de manera que pese a que no se conseguirá la máxima ganancia posible, tampoco existirán puntos donde la ganancia Raman sea nula. Se estará en un caso intermedio donde la ganancia Raman obtenida será la mitad de la ganancia máxima posible.

La amplificación Raman, como todo sistema de amplificación, no es perfecto. De modo que existirá un ruido asociado a la amplificación. La señal que se desea amplificar será una señal de banda ancha, y en muchos casos estará modulada, de modo que se tendrá ruido debido a la amplificación Raman espontánea, que al interactuar con la señal de bombeo se amplificará. Se conoce como “*Backward ASS (Backward Amplified Spontaneous Scattering)*” y “*Forward ASS (Forward Amplified Spontaneous Scattering)*”, según el sentido de propagación del ruido. Es lo que en la amplificación mediante fibra dopada con erbio se conoce como ruido ASE. Este ruido es incoherente, sin polarización concreta y de banda ancha.

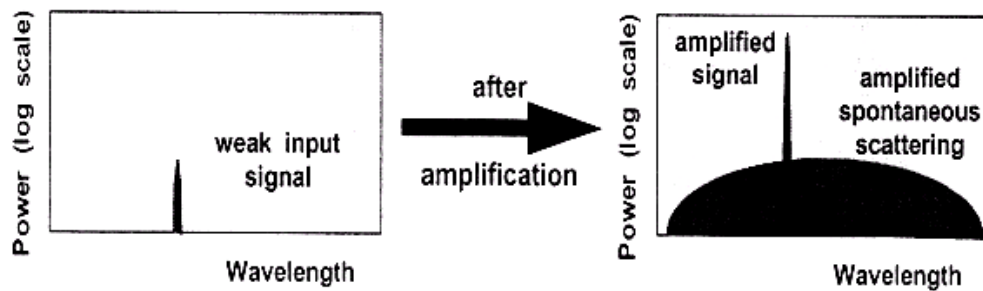


Figura 1.12: Ruido ASS añadido a una señal

Otro tipo de ruido que aparece es la dispersión Rayleigh. Todos los tipos de fibra la producen, y su efecto es mayor conforme aumenta el contenido de Germanio (GeO_2) en la composición de la fibra. La longitud de onda que se refleja debido a este efecto, es de la misma longitud de onda que la señal de información.

Los casos en los que es considerable el efecto de la dispersión Rayleigh son los siguientes:

- En amplificaciones de enlaces de muy larga distancia, por ejemplo en enlaces submarinos.
- Cuando se trabaja con altas potencias de señal. Puede ocurrir que con altas potencias de bombeo Raman se generan altas ganancias Raman.
- En fibras con alto contenido de Germanio. Cuanto mayor sea el contenido de Germanio mayor será la ganancia Raman, pero también habrá un aumento del ruido.
- En fibras con alto dopaje de compuestos fluorados.

Para minimizar los efectos de la dispersión Rayleigh se utilizan dos técnicas. La primera de ellas consiste en reducir el contenido de Germanio lo máximo posible y la segunda, diseñar los sistemas adecuadamente para evitar altas potencias de señal.

1.2.3.2 Cálculo de la posición y el valor máximo de la ganancia

Mediante una sencilla ecuación es posible calcular la longitud de onda que sufrirá una mayor ganancia Raman para una potencia de bombeo concreta.

$$\nu_s = \nu_p - \Delta\nu_R$$

Donde: $\Delta\nu_R = 13,5 \text{ Thz}$

ν_s = frecuencia de la señal de información

ν_p = frecuencia de la señal de bombeo utilizada

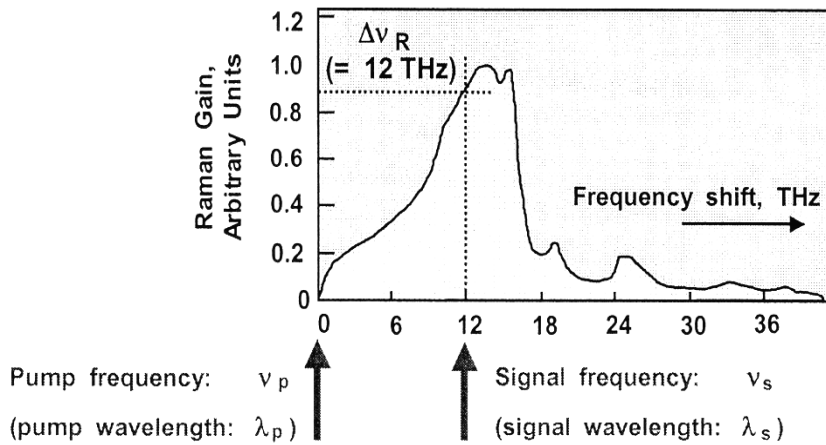


Figura 1.13: Curva de ganancia Raman indicando las longitudes de onda de bombeo y la de ganancia máxima.

Para conocer el valor de la ganancia Raman (g) en ese punto se usa un método comparativo. De medidas experimentales se sabe que para $\lambda_p=1450\text{nm}$ y $\lambda_s=1550\text{nm}$, con polarización aleatoria se tiene que:

$$g = \frac{g_{pico}}{2} = (3,2 \pm 0,2) \times 10^{-14} \text{ m/Watio}$$

Donde g_{pico} es la ganancia Raman máxima obtenible.

De modo que aplicando una simple regla de tres se puede obtener el valor aproximado de una g de cada caso. Se puede observar como se ha dividido el valor de g_{pico} por un factor 2. Éste es el precio a pagar por utilizar polarización aleatoria.

1.2.3.3. Aplicación de la amplificación Raman

Como ya se ha visto, para amplificar la longitud de onda deseada, basta con elegir la longitud de onda de bombeo adecuada. Pero además de esto, existe la posibilidad de hacer variar la curva de ganancia Raman mediante la introducción de varias longitudes de onda de bombeo. Esta aplicación es muy interesante, ya que podríamos conseguir aplanar la curva de ganancia con las ventajas que esto conlleva.

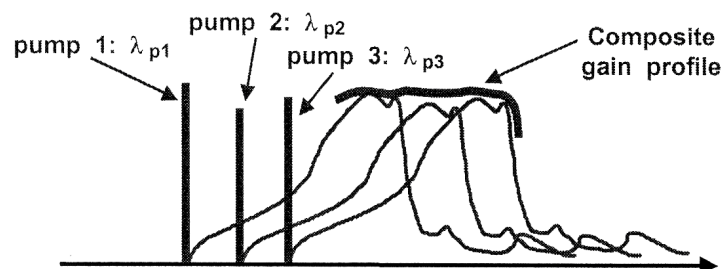


Figura 1.14: Perfil de ganancia Raman al introducir varias longitudes de onda de bombeo.

1.2.3.4. Tipos de bombeo Raman

El bombeo Raman se puede aplicar de tres modos distintos:

- Bombeo Raman codireccional con la señal, la señal y el bombeo viajan en el mismo sentido. En este recorrido el bombeo va cediendo potencia a la señal de información. El ruido introducido en este tipo de bombeo es mayor, ya que todas las oscilaciones en la señal de bombeo se traspasan a la señal de información.
- Bombeo Raman contradireccional con la señal, la señal de información y el bombeo viajan en sentido contrario. Este bombeo introduce menor nivel de ruido en la señal, ya que al no viajar unidos, las variaciones en la señal de bombeo no afectan a la señal de información.
- La tercera forma sería introduciendo tanto bombeo codireccional como bombeo contradireccional. Esto puede ser útil en aquellas aplicaciones en las que con un único bombeo no se consiguen los objetivos deseados.

1.2.3.5. Ganancia Raman

Existen dos tipos de ganancia, según cómo se desee describir:

$$G_{in_out} = \exp \left\{ \frac{g_s}{KA_{eff}} \cdot P_{bombeo} \cdot L_{eff} - \alpha_s L \right\}$$

$$G_{on_off} = \exp \left\{ \frac{g_s}{KA_{eff}} \cdot P_{bombeo} \cdot L_{eff} \right\}$$

Donde:

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha_p L}}{\alpha_p}$$

L = longitud de la fibra

L_{eff} = longitud efectiva de la fibra

A_{eff} = área efectiva de la fibra

g_s = ganancia a la longitud de onda de la señal

K = factor de corrección de la ganancia debido a la diferencia de polarización

α_s = atenuación de la fibra a la longitud de onda de la señal de información

α_p = atenuación de la fibra a la longitud de onda de la señal de bombeo

P_{bombeo} = Potencia de bombeo

Para el cálculo de g_s se usa una regla de tres. Por ejemplo, para un bombeo a 1000nm sabemos que $g_s = 9,88 \times 10^{-14}$ m/W. De modo que si deseamos conocer la g_s para un bombeo a 1428nm, las cuentas que se deben hacer son:

$$g_s = \left(\frac{1000}{1428} \right) \cdot 9,88 \times 10^{-14} \approx 6,92 \times 10^{-14} \text{ m/Watio}$$

El valor de K siempre será K=2, ya que se están usando polarizaciones aleatorias. El resto de parámetros (L_{eff} , A_{eff} , L , α_s) son parámetros de la propia fibra, por lo que son conocidos. De este modo, es posible jugar con P_{bombeo} para conocer la ganancia y viceversa, para una G dada conocer el P_{bombeo} que será necesario.

1.2.3.6. La ganancia Raman a lo largo de la fibra óptica

El efecto Raman es un efecto no lineal, de modo que la ganancia Raman no será una ganancia lineal. Por ejemplo, para un tramo de 50km de SMF si se calcula de forma teórica la potencia necesaria para tener transparencia, se obtiene que ésta es de 416mW.

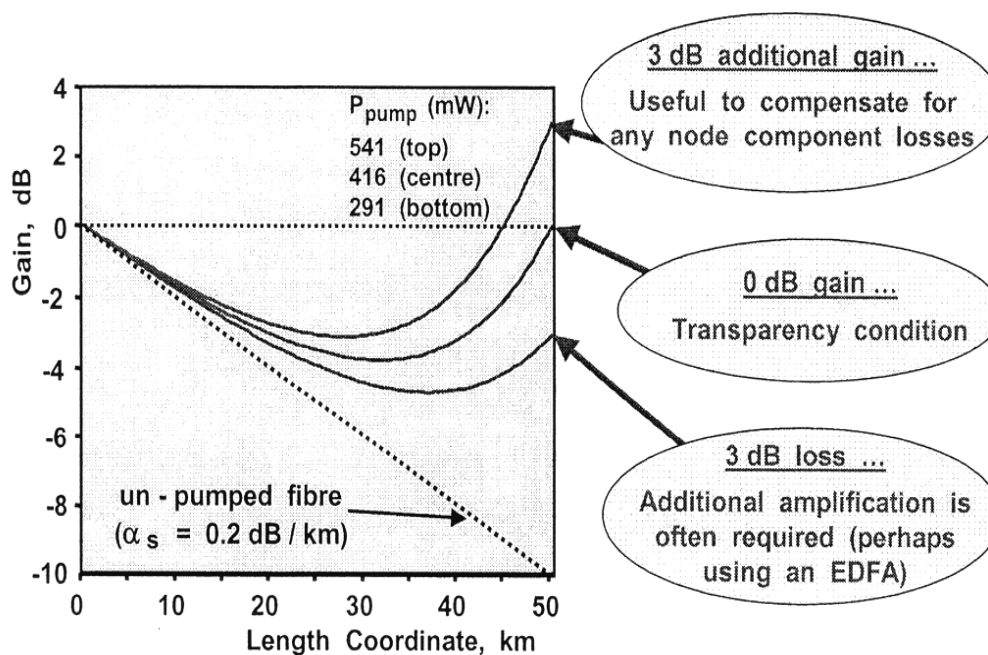


Figura 1.15: Ganancia Raman frente a la distancia

Se puede observar como el aumento de la ganancia es mucho mayor al final del tramo de fibra. Es importante darse cuenta de que si se disminuye la distancia del tramo será necesario el aumento de la potencia de bombeo para conseguir la misma ganancia. Este efecto tendrá su límite, ya que existe una distancia mínima que es necesaria para obtener una ganancia Raman apreciable con unas potencias lógicas. Esto lleva a la

conclusión de que la amplificación Raman es muy útil cuando las distancias son grandes.

De la figura 1.15 se deduce también que con amplificación Raman la transparencia sólo se garantiza en un punto del bus, es decir, exigiendo transparencia en el receptor, no se garantiza transparencia al final del bus.

1.3. Dispersión Brillouin

1.3.1. Introducción

Como ya hemos visto existen varios procesos distintos de dispersión espontánea cuando una radiación electromagnética a frecuencias ópticas atraviesa un material. En ellos la luz es dispersada por fluctuaciones del índice de refracción causadas por excitaciones elementales del medio. Aparecen así fenómenos de dispersión Rayleigh, Raman o Brillouin en función del tipo de interacción. Todos estos efectos de dispersión espontánea tienen como característica común que la luz dispersada es una fracción muy pequeña de la luz incidente. Sin embargo, bajo determinadas condiciones (como la presencia de altas intensidades ópticas con fuentes de pequeña divergencia y alta coherencia) estos fenómenos pueden sufrir estimulación, dando lugar a una amplificación exponencial de la luz dispersada.

En fibras ópticas la dispersión de Brillouin estimulada (*stimulated Brillouin scattering*, SBS) es el fenómeno de dispersión dominante, ya que empieza a ser significativo a potencias relativamente bajas, del orden de mW, en fibras con algunos kilómetros de longitud. Aparte de su baja potencia óptica umbral, las características más importantes del SBS son la generación de alta ganancia para una onda de Stokes que se propaga en sentido opuesto al del bombeo y lo selectivo de esta amplificación, dada la pequeña anchura de línea de su espectro en ganancia.

El efecto SBS tiene infinidad de aplicaciones, entre ellas la utilización como método sensor en fibras ópticas, donde puede utilizarse por ejemplo como sensor distribuido de temperatura.

1.3.2. Dispersión Brillouin estimulada en fibras ópticas

Cuando una radiación electromagnética a frecuencias ópticas atraviesa un material pueden ocurrir distintos procesos de *scattering* espontáneo. En ellos la luz es dispersada por fluctuaciones del índice de refracción causadas por excitaciones elementales del medio. En función de con qué interaccione la luz, el fenómeno de dispersión recibe un nombre u otro: Rayleigh para una interacción con inhomogeneidades, Raman con vibraciones moleculares o Brillouin con ondas acústicas en el material.

El fenómeno SBS se describe de forma clásica como la interacción entre una onda de bombeo, una onda de Stokes y una onda acústica. La onda de bombeo y la onda de Stokes se propagan por la fibra óptica en sentido opuesto, creando un patrón de interferencia móvil que, por efecto de electrostricción, induce una onda acústica. A su vez, esta onda acústica genera una perturbación periódica en el índice de refracción de la fibra (debido a la dependencia de éste con la densidad) que puede reflejar la onda de bombeo por difracción Bragg. La luz reflejada sufre una disminución de frecuencia debido al desplazamiento Doppler asociado a la velocidad V_a de la onda acústica en el medio. Todo esto se traduce en una transferencia de potencia entre las ondas de bombeo y de Stokes que, simultáneamente, potencia la onda acústica, generándose una estimulación del proceso descrito. El resultado neto de esta interacción es que, conforme las señales se propagan por la fibra óptica, la onda de Stokes es amplificada y el bombeo sufre una pérdida o vaciamiento de potencia.

Desde el punto de vista de la mecánica cuántica, la dispersión de Brillouin consiste en la aniquilación de un fotón de bombeo, creándose, simultáneamente, un fotón de Stokes y un fonón acústico. Las tres ondas deben cumplir la condición de conservación de la energía que relaciona sus frecuencias ópticas:

$$\omega_A = \omega_P - \omega_S$$

Y la conservación del momento, que implica máxima transferencia de potencia cuando la desadaptación de los vectores de onda es cero:

$$K_A = K_P - K_S$$

Los subíndices P, S y A se refieren, respectivamente, al bombeo, a la onda de Stokes y a la onda acústica. Estas relaciones tienen dos importantes consecuencias: primero, que la onda de Stokes sólo experimenta ganancia Brillouin cuando la onda de bombeo y ella se propagan en sentidos opuestos, y, segundo, que el desplazamiento en frecuencia de la onda de Stokes viene dado por:

$$\nu_B = \frac{2nV_a}{\lambda}$$

Donde n es el índice de refracción de la fibra, V_a la velocidad de la onda acústica en la fibra y λ es la longitud de onda de bombeo. En fibras ópticas de sílice este desplazamiento en frecuencia es del orden de los ν_B , a la longitud de onda de 1550 nm.

La onda de Stokes que participa en la interacción SBS puede ser una señal óptica externa que se inyecta a la fibra óptica, o ser generada internamente como resultado de la dispersión de Brillouin espontánea. Este efecto es consecuencia de la difracción de la onda de bombeo inducida por ondas acústicas excitadas térmicamente, y se produce a lo largo de toda la fibra.

El espectro de ganancia del SBS se caracteriza principalmente por tres parámetros: el desplazamiento Brillouin, ν_B , la anchura espectral, $\Delta\nu_B$ y el coeficiente de ganancia Brillouin, g_{B0} . Además la forma de este espectro coincide con el perfil de una función Lorentziana dada por:

$$H(\Delta\nu) = \pm g_B \frac{(\Delta\nu_B/2)^2}{\Delta\nu + (\Delta\nu_B/2)^2}$$

El signo dependerá de si $\nu_P - \nu_S$ es positivo o negativo, y se corresponderá con un sistema en ganancia (+) o en vaciamiento (-).

El valor de la ganancia Brillouin de pico viene dado por:

$$g_{B0} = \frac{2\pi n^7 p_{12}^2 \gamma}{c \lambda_p^7 \rho_0 \nu_a \Delta\nu_B}$$

Donde p_{12} es el coeficiente elasto-óptico longitudinal, ρ_0 la densidad del material, c la velocidad de la luz en el vacío, λ_p la longitud de onda de bombeo y γ es un factor que depende de la orientación relativa de la polarización del bombeo y la onda de Stokes.

1.4. Láseres de fibra

1.4.1. Introducción

Los láseres de fibra se comportan como estructuras de guía-onda que pueden tener altas densidades de potencia en el núcleo. Al estar basados en fibra óptica tienen todas las ventajas que la tecnología permite: bajas pérdidas por dispersión, bajas absorciones no deseadas, pocas imperfecciones del material. Permiten un buen solapamiento entre las ondas guiadas del bombeo y de emisión láser cuando se utilizan fibras monomodo en ambas longitudes de onda. Las fibras ópticas presentan una relación entre superficie y volumen alta que permite una buena disipación del calor.

Los factores anteriormente citados, así como su geometría cilíndrica, hacen de los láseres de fibra dispositivos idóneos para aplicaciones médicas, así como para sistemas de transmisión con alta eficiencia de acoplo operando con bajos niveles de potencia de bombeo.

Los diferentes diseños de láseres de fibra permiten obtener anchuras de línea muy estrechas y longitudes de onda sintonizables, operando con una potencia umbral de bombeo baja. La longitud de onda de emisión láser viene determinada por el dopante y su característica espectral, por lo que variando tanto la composición como la densidad de dopaje se podrá modificar el espectro de emisión del láser.

La estructura básica de un láser de fibra se muestra en la figura 1.16.

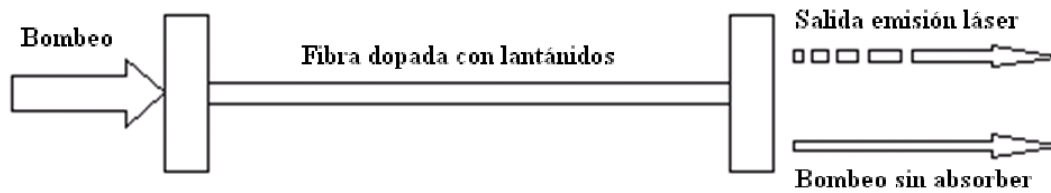


Figura 1.16: Estructura básica de un láser de fibra

Se sitúa una fibra óptica dopada con algún tipo de iones de tierra rara entre dos espejos cuidadosamente seleccionados. A través del espejo de la izquierda se introduce luz de un láser de bombeo, y a través del espejo de la derecha se extrae la luz de salida. El láser de fibra es un dispositivo de guía-onda resonante en el que el guiado se realiza en la fibra y la resonancia se obtiene por medio de los dos espejos, lo que equivale a una estructura Fabry Perot.

Los láseres de fibra pueden verse como un convertidor de longitud de onda. Los fotones a la longitud de onda de bombeo son absorbidos, produciendo la inversión de población y la emisión estimulada necesaria para que se produzca la emisión láser en la longitud de onda característica determinada por el dopante de la fibra y las características de la cavidad resonante.

1.4.2. Cavidad Fabry-Perot

Básicamente una cavidad resonante consta de un par de espejos parcialmente transmisores situados en ambos extremos de un medio activo. Cuando se lanza un haz de luz a través del dispositivo las interferencias entre las múltiples reflexiones dan lugar a respuestas en frecuencia periódicas. La potencia de salida del dispositivo será alta cuando se cumpla la condición de resonancia y baja en resto de situaciones.

La condición de resonancia se da cuando la longitud de la cavidad es la mitad de un número entero de longitudes de onda. Se puede definir el rango espectral libre o FSR como el espacio frecuencial entre resonancia y viene dado por:

$$\text{FSR} = \frac{c}{2 \cdot n \cdot L}$$

Otra expresión de interés es la fineza, que puede interpretarse como el número de modos de resonancia que caben en la FSR. La expresión de la fineza es la siguiente donde R representa la reflectividad de los espejos cuando para ambos es la misma

$$F = \frac{\pi \cdot \sqrt{R}}{1 - R}$$

1.4.3. Láseres de fibra dopada con Erblio con configuración en anillo

La generación de luz láser se consigue introduciendo un medio amplificador en una cavidad. Dicha cavidad cumple dos funciones, por un lado confina la potencia debido a la emisión estimulada de modo que la señal atraviese múltiples veces el medio amplificador y, por otro, determina las frecuencias ópticas de emisión del láser. Hay que tener en cuenta que el origen de la emisión de luz láser se encuentra en la emisión espontánea que produce el medio activo, la cual se amplifica por emisión estimulada en los sucesivos pasos por dicho medio.

El uso de configuraciones en anillo permite la operación de un láser sin espejos. Los sucesivos pasos por el medio amplificador se consiguen por recirculación a lo largo del anillo. Si el láser en anillo es de fibra, todos sus componentes (medio activo, elementos selectores de longitud de onda, etc.) quedan integrados en la cavidad. La salida del láser se realiza a través de un acoplador.

En la fibra de sílice dopada con erbio la amplificación se produce en una banda ancha de frecuencias ópticas dentro de la tercera ventana de comunicaciones. Por ello, puede conseguirse emisión láser en un intervalo amplio de longitudes de onda (desde 1520nm hasta 1580nm). La longitud de onda de emisión del láser puede seleccionarse mediante el uso en el interior de la cavidad de una amplia variedad de filtros ópticos: Fabry-Perot, acusto-ópticos, AWG o redes Bragg (FBG) entre otros.

La configuración básica del láser de fibra se presenta a continuación:

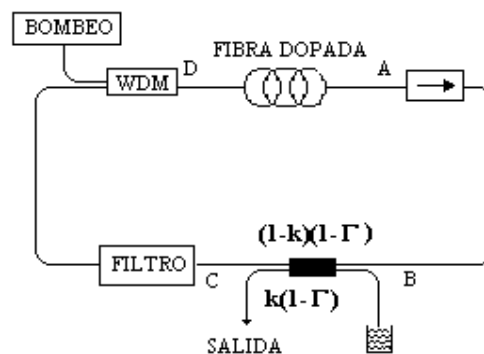


Figura 1.17: Esquema de un láser de anillo de fibra dopada con erbio

La potencia de bombeo a 980nm se acopla al anillo mediante un multiplexor en longitud de onda. Para la selección de la longitud de onda de trabajo del láser, se utiliza un filtro en frecuencia óptica. Por último, un acoplador sirve para obtener la salida láser.

A veces se incluye un aislador para eliminar la onda que se propaga en sentido contrario por el anillo para evitar el fenómeno conocido como “*spatial hole burning*”. Si dos señales con igual longitud de onda se propagaran por el anillo en sentidos opuestos, se producirá, al superponerse ambas, un patrón de interferencia dando lugar a

la formación de una onda estacionaria. En esta situación, en un láser de fibra óptica bombeado con una potencia muy superior a la potencia umbral se tendría que la inversión de población se “consumiría” principalmente en los antinodos teniéndose en ellos amplificación mientras que en los nodos se acumularía una fuerte inversión de población. Este fenómeno sería el causante de salto de modos en la cavidad y por tanto, el responsable de inestabilidades en la longitud de onda de funcionamiento del láser y en consecuencia, de un aumento en la anchura de línea del láser.

En el diseño del láser, deben considerarse las pérdidas de la cavidad y la relación de acoplo para optimizar el funcionamiento del sistema.

Para valores altos de la relación de acoplo, se obtienen potencias de salida elevadas. En esta situación, debido a que se extrae mucha potencia de la cavidad, llega poca potencia a la fibra dopada. La ganancia proporcionada por ésta, es mayor cuanto menor es la potencia a su entrada por lo que con tasas de acoplo elevadas, se consigue una alta eficiencia. Sin embargo, la ganancia que puede proporcionar un tramo de fibra dopada no es infinita por lo que existe un valor óptimo de k por encima del cual la ganancia de la fibra dopada no es suficiente para superar las pérdidas de la cavidad.

Todas las pérdidas en la cavidad hacen que disminuya la potencia de salida del láser. Es importante la localización, dentro de la cavidad, de los componentes que introducen pérdidas. Si éstos se encuentran entre el acoplador de salida y la fibra dopada, el efecto de las pérdidas será compensado, en parte por una mayor ganancia en la fibra dopada (siempre que se trabaje con ganancias inferiores a la de saturación de la fibra). Sin embargo, si se producen entre los puntos A y B de la figura 1.17, afectan directamente a la salida, reduciendo la potencia del láser. Por tanto, hay que minimizar las pérdidas totales de la cavidad, especialmente las que se producen entre la salida de la fibra dopada y el acoplador de salida, para conseguir potencias de salida elevadas con bajos valores de potencia de bombeo umbral.

1.5. Acoplador direccional

Un acoplador bidireccional es un dispositivo pasivo que distribuye energía procedente de M guías de entrada en N guías de salida. Los acopladores son los componentes más usados en las comunicaciones de fibra óptica, en instrumentación y en sistemas sensores. Los hay en una gran variedad de formas y de diseños, y se pueden realizar en fibras monomodo (incluyendo mantenimiento de la polarización) y multimodo o en guía-ondas integradas.

Los acopladores tienen aplicaciones interesantes tanto en la división de potencia, como en la multiplexación/demultiplexación en longitud de onda, o en la división por polarización, etc.

En los acopladores direccionales, se usa el fenómeno óptico del campo evanescente. Este efecto de las guías puede analizarse en función del campo modal del modo guiado que se extiende más allá del núcleo. Así, cuando dos núcleos de fibra (o guía-ondas planas) se aproximan lo suficiente de tal forma que sus campos modales se solapan, entonces los modos de las dos fibras se acoplan y la potencia puede ser transferida periódicamente entre las dos fibras. Este mecanismo se puede describir por la teoría acoplo de modos.

Si la constante de propagación de los modos de las dos fibras es igual, entonces la potencia adaptada entre las guías es completa. Para un acoplador direccional con dos fibras monomodo idénticas, si $P_1(0)$ es la potencia lanzada a la fibra 1 y despreciando pérdidas ópticas, entonces a cualquier longitud de acoplo z , la potencia que se propaga en las dos fibras sigue la siguiente ecuación:

$$P_1(z) = P_1(0) \cos^2(kz)$$

$$P_2(z) = P_1(0) \sin^2(kz)$$

Donde k es el coeficiente de acoplo y es una medida de la fuerza de la interacción entre las dos fibras, la cual depende de los parámetros de la fibra, la distancia entre núcleos y la longitud de operación. Correspondientemente con las ecuaciones anteriores, se tiene que se da un cambio periódico de la potencia entre las dos fibras a lo largo de la zona de acoplo z . En $z = q\pi/k$ ($q = 0, 1, 2, \dots$) tenemos que $P_1(z) = P_1(0)$ y $P_2(z) = 0$ (toda la potencia está en la fibra de entrada). Para valores de $z = (q+1/2)\pi/k$ entonces tenemos que $P_1(z) = 0$ y $P_2(z) = P_1(0)$ (toda la potencia se acopla en la otra fibra. El valor de $z = L_c = \pi/2k$ se denomina longitud de acoplo del acoplador direccional.

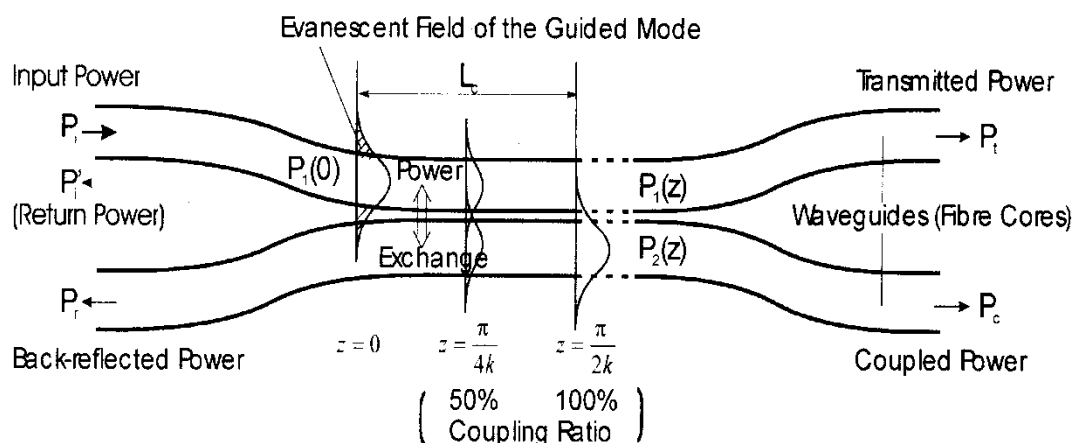


Figura 1.18: Principio de campo evanescente en un acoplador direccional

En la figura 1.18, se puede ver la forma de un acoplador direccional 2x2 y el acoplo de potencia. Basándonos en esta figura, tenemos que la potencia que se introduce en el puerto de entrada es P_i , P_t es la potencia transmitida, P_c es la potencia acoplada en la otra fibra, P_r es la potencia reflejada y P_i' es la potencia reflejada de retorno.

Los parámetros de un acoplador son los siguientes:

- Rango de longitudes de onda de operación
- Relación de acoplo: nos da información acerca de la división de la potencia óptica entre los puertos de salida.

$$R(\%) = \frac{P_c}{P_c + P_t} * 100 \quad R(dB) = 10 \log \left(\frac{P_c + P_t}{P_c} \right)$$

- Pérdidas de exceso: da la relación entre la potencia total de entrada al dispositivo y la potencia de salida del mismo.

$$L_e(dB) = 10 \log \left(\frac{P_i}{P_t + P_c} \right)$$

- Pérdidas de inserción: Pérdidas introducidas por el acoplador al considerar la propagación de la señal de una determinada configuración de puerto de entrada y de salida.

$$L_i(dB) = R(dB) + L_e(dB) = 10 \log \left(\frac{P_i}{P_c} \right)$$

- Directividad: Fracción de potencia de entrada que el acoplador devuelve en forma de señal retropropagada en la guía 2.

$$D(dB) = 10 \log \left(\frac{P_i}{P_r} \right)$$

- Pérdidas de retorno: Cantidad de potencia reflejada hacia el puerto de entrada. Parámetro muy importante en las aplicaciones interferométricas donde se usan fuentes de luz láser.
- Uniformidad: $(P_t - P_c)/P_t$
- Sensibilidad a la polarización.
- Estabilidad térmica

Una buena actuación del acoplador direccional conlleva unas bajas pérdidas de exceso y una gran directividad. Valores típicos de acopladores de fibra monomodo son $L_e < 0.1\text{dB}$ y $D > 55\text{dB}$. La relación de acoplo a una longitud de onda de operación dada puede variar en un amplio rango dependiendo de la aplicación requerida, por ejemplo 50% (acoplador estándar de 3dB) para giroscopos de fibra, un pequeño tanto por cien para aplicaciones de sensores distribuidos, o un valor cercano al 100% para sensores resonadores.

Combinando en cascada los acopladores básicos de 4 puertos (2x2) explicados en este apartado, se pueden crear arquitecturas más complejas como 1×2^n o acopladores $M \times N$.

Los acopladores se clasifican en dos tipos según el mecanismo empleado para conseguir el acoplo de señales: de campo evanescente y de interferencia modal. Ambos tipos de acopladores pueden construirse tanto en tecnología de fibra óptica como en óptica integrada.

- Acoplador de campo evanescente
- Acoplador de fibra fusionada

1.6. Redes de difracción de Bragg

Una red de difracción es un tramo de pequeña longitud (1mm-20cm) de fibra óptica monomodo al que se le introduce una perturbación periódica en el índice de refracción del núcleo con el objetivo de producir una transferencia selectiva en longitud de onda entre los modos fundamentales que se propagan en sentidos contrarios en una guía óptica.

Los patrones de perturbación se obtienen por medio de un fenómeno de foto-sensibilidad que será descrito más adelante. En primer lugar, se va a presentar la teoría básica de las Redes de Difracción.

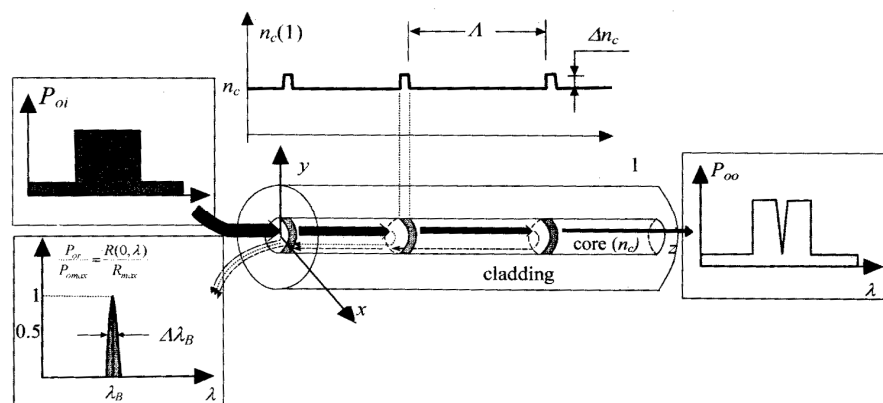


Figura 1.19: Ilustración del concepto de Red de Difracción y su función óptica

En esta particular aproximación, tal y como muestra la figura 1.19, el índice de refracción de la red de difracción mantiene un valor constante de n_c y la perturbación tiene un valor de $(n_c + \Delta n_c)$. Esta perturbación se da con una periodicidad de Λ . Si se introduce una señal óptica P_{oi} en el núcleo de la fibra, una cierta porción de la luz se dispersa debido a la variación en el índice de refracción (Δn_c). Esta radiación dispersada se suma en fase sólo en ciertas direcciones si se satisface la condición de fase. Se hará mención a un ejemplo en particular (el que se muestra en la figura 1.19). Si se satisfacen las condiciones de propagación monomodo en la fibra a la longitud de onda Bragg λ_B (o longitud de onda de resonancia), en cada plano de perturbación (plano grating) una porción de fotones se verá reflejada en fase. De este modo, se generará un modo de propagación de retorno. La potencia de este modo, P_{or} , se determina integrando la radiación dispersada a la longitud de onda λ_B , como se ve en la figura 1.19. El resto de potencia óptica, P_{oo} , se transmite como un modo de propagación normal. Para este caso, el pico del modo de acoplo en el espectro reflejado se da a la longitud de resonancia λ_B , que se logra mediante la fórmula:

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda$$

En esta expresión, n_{eff} representa el índice de refracción efectivo del modo. Por lo tanto, cualquier perturbación en el valor del n_{eff} y/o del Λ provoca una variación en la longitud de onda Bragg.

1.6.1.1. Modos acoplados y excitados

Se considerarán las Redes de Difracción como planos a los que se les ha introducido una variación en el índice de refracción periódica, con periodo Λ . En los siguientes párrafos, se explica de forma general la teoría de acoplo de ondas (*Coupled-Wave Theory*), ya que en general esta es la teoría más utilizada para entender la función de una Red de Difracción.

- Forma de los modos de las estructuras no perturbadas o de las estructuras no acopladas. La descripción general de estos modos se puede escribir de la siguiente forma;

$$V(x, y, z) = \sum_{i=1}^m \psi_i(x, y) a_i(z) e^{-j \int \beta_i(x, y, z) dz}$$

Donde: $\Psi_i(x, y)$ es la distribución de campo transversal

$a_i(z)$ es la amplitud longitudinal del campo modal

$\beta_i(x, y, z)$ es la constante de propagación correspondientes al modo i-ésimo.

- La perturbación $\Delta n(x,y,z)$ se define de la siguiente forma:

$$\Delta n(x,y,z) = n_c(x,y,z) - n_{co} = \Delta n_{co}(x,y,z) \{ 1 + m(x,y,z) A(z) F[z, \Lambda(z)/\cos\theta, \phi(x,y)] \}$$

$\Delta n(x,y,z)$ es el índice de perturbación

n_{co} es el índice no perturbado

$\Delta n_{co}(x,y,z)$ es el valor medio del índice del núcleo en la zona perturbada;

$m(x,y,z) = \Delta n(x,y,z) / \Delta n_{co}(x,y,z)$ es la visibilidad de la modulación, proporcional a la visibilidad de borde, en la cual Δn es la amplitud de modulación del índice de refracción.

$A(z)$ es una función de apodización

$F[z, \Lambda(z)/\cos\theta, \phi(x,y)]$ es la función de forma, en la cual $\Lambda(z)$ puede variar de forma que el incremento del chirp sea en función de z , $\cos\theta$ representa la inclinación de la perturbación

$\phi(x,y)$ es la función de fase grating

- La respuesta de la polarización producida por la perturbación del índice es periódica en el núcleo. El coeficiente de acoplo k entre el modo incidente 1 y el modo 2 se puede calcular como

$$\kappa(z) = (\pi / \lambda) A(z) \frac{\iint_{\text{fiber}} \psi_1(x,y) \psi_2^*(x,y) \Delta n(x,y) e^{j\int \phi(x,y)} dx dy}{\iint_{\text{fiber}} |\psi_1(x,y)|^2 dx dy}$$

Las ecuaciones de acoplo son las siguientes

$$\frac{da_1(z)}{dz} = \pm j \kappa(z) e^{-j\int \Delta\beta(x,y,z) dz} a_{2(z)}$$

$$\frac{da_2(z)}{dz} = \pm j \kappa^*(z) e^{j\int \Delta\beta(x,y,z) dz} a_{1(z)}$$

Donde: el signo menos representa el modo que viaja hacia atrás y el signo más representa el que viaja hacia delante.

$\Delta\beta(x,y,z) = (\beta_1 - \beta_2) - K$ es el parámetro de desfase que representa la desviación desde la condición de resonancia o condición Bragg.

Para cualquier perturbación de la red de difracción, la solución de las ecuaciones proporcionará la amplitud del campo a_1 y a_2

La reflectividad local se calcula a partir de las ecuaciones de acoplo. Se define como:

$$r(z, \lambda) = \left[\frac{a_2(z)}{a_1(z)} \right] e^{j \int \Delta\beta(z) dz}$$

El coeficiente de reflexión $R(z, \lambda) = |r(z, \lambda)|^2$ se obtiene de forma sencilla. En la figura 1.19, están ilustrados dos parámetros de respuesta muy importantes de las Redes de Difracción. Estos parámetros se miden a la entrada de ésta a través de la función de reflectancia $R(0, \lambda)$. Los parámetros son: la longitud de onda Bragg a la longitud de onda de mayor reflectancia; y el ancho de banda de reflectancia, por ejemplo como el ancho a la caída mitad (Full Width at Half Maximum=FWHM).

Para tener una simple pero representativa herramienta para describir el comportamiento de la red de difracción, se explicará el resultado de una red de difracción apodizada sin inclinación en los planos *grating* del núcleo para una fibra monomodo con un índice de refracción que varía de forma sinusoidal con periodo constante, de la siguiente forma: $\Delta n(z) = \Delta n_{co}(z) + \Delta n_{co}(z) A(z) \cos [(2\pi z/\Lambda) + \phi]$. De este modo el coeficiente de acoplo, la reflectancia de la longitud de onda Bragg y el ancho de banda de reflectancia son:

- El coeficiente de acoplo se puede obtener de la siguiente forma:

$$\kappa(z) \approx (\pi/\lambda) A(z) \Delta n_{co} \xi$$

Donde ξ es el factor de solapamiento de la perturbación del índice modal el cual para un modo de reflexión guiado desde un *grating* uniformemente transversal representa la fracción de la potencia del modo en el núcleo.

- La reflectancia de la longitud de onda Bragg a la entrada es:

$$R(0, \lambda_B) \approx \tanh^2[\kappa L]$$

Se puede notar como con baja reflectividad, el coeficiente de acoplo es proporcional a la modulación del índice de refracción.

- El ancho de banda de reflectancia se puede aproximar por:

$$\Delta\lambda_B \approx s \lambda_B \{ [A_{\text{valor medio}} \Delta n_{co} \xi / (2 n_{\text{valor medio}})]^2 + (\Lambda/L)^2 \}^{1/2}$$

Donde s es el factor que depende de la fuerza que ejerce la perturbación *grating*. Este factor es cercano a uno para perturbaciones con fuerte índice ($R \rightarrow 1$) y $s \rightarrow 0.5$ para perturbaciones débiles (bajos valores de R).

Hasta ahora, se ha realizado una breve explicación de las distintas formas de la perturbación del índice de refracción y lo que ello conlleva (propagación en reflexión, modos de cubierta en reflexión, modos radiados y modos de cubierta en transmisión), la formulación de los distintos parámetros y la propuesta de un ejemplo.

1.6.1.2. Posibles perturbaciones del índice de refracción

A continuación, se van a presentar distintas formas de perturbación para el índice de refracción. En todas ellas, los planos del *grating* están orientados perpendicularmente a la dirección axial de la fibra. Esto quiere decir que para todos los casos estamos ante la situación de modos de propagación en reflexión (figura 1.19), y por lo tanto ante redes de difracción Bragg, como se explicó anteriormente.

Dentro de la opción de propagación en reflexión, hay distintos tipos de redes de difracción dependiendo de la forma de la perturbación del índice de refracción. Por un lado están las redes de difracción *uniformemente constantes* en las que el índice de refracción varía sinusoidalmente pero con una amplitud constante, como se muestra en la figura.

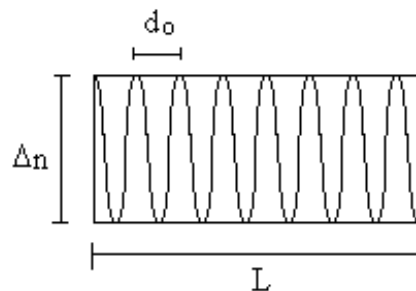


Figura 1.20: Forma de variación del índice de refracción en las FBG uniformes constantes

Estas Redes de Difracción Bragg tienen un espectro en reflexión como el que se muestra en la figura 1.21.

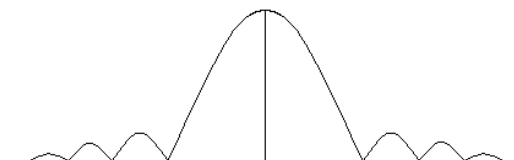


Figura 1.21: Espectro en reflexión de una FBG uniforme

Por otro lado están las redes de difracción Bragg *uniformes apodizadas*, en las que el índice de refracción varía sinusoidalmente pero su amplitud no es constante.

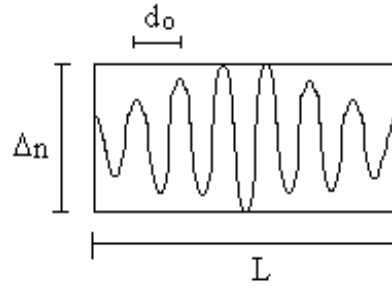


Figura 1.22: Forma de la variación del índice de refracción en las redes de difracción Bragg uniformes apodizadas

Estas redes consiguen eliminar los lóbulos laterales que se tienen para el caso de las redes uniformes. El espectro en reflexión es el siguiente:

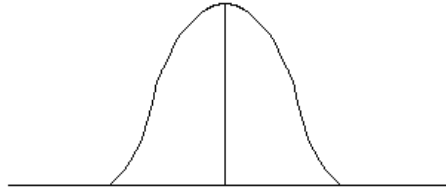


Figura 1.23: Espectro en reflexión de una FBG uniforme apodizada

Aunque también se ha utilizado alguna red de difracción de periodo largo, el tipo de red de difracción utilizada generalmente en el proyecto es la red de difracción bragg uniforme constante donde la forma del índice de refracción no es constante con la dirección de propagación z , sino que varía de forma sinusoidal de acuerdo con la siguiente expresión:

$$n(z) = n_1 + \Delta n \cdot \frac{1 + \sin(\Omega \cdot z)}{2}$$

Donde los parámetros Δn y Ω representan la profundidad y el número de onda de la perturbación respectivamente.

Las ecuaciones de acoplo de modos que modelan este dispositivo son:

$$\begin{aligned} \frac{dA_{(z)}^+}{dz} &= \kappa_0 \cdot \exp[j(2\beta - \Omega)z] \cdot A_{(z)}^- \\ \frac{dA_{(z)}^-}{dz} &= \kappa_0 \cdot \exp[-j(2\beta - \Omega)z] \cdot A_{(z)}^+ \end{aligned}$$

Siendo el coeficiente de acoplo.

$$\kappa_0 = \Delta n \cdot \frac{\omega \epsilon_0 n_1}{4P} \int_S E_t^+ E_t^- dS$$

Para que el acoplo entre ambos modos sea máximo tiene que cumplirse la condición de adaptación de fases. Se produce entonces una reflexión con pérdidas casi nulas, a la longitud de onda para la que se verifica la condición, al pasar toda la potencia transportada por el modo progresivo al regresivo.

Considerando una variación sinusoidal uniforme de periodo d_0 , la condición de adaptación de fases viene expresada como:

$$\left. \begin{array}{l} 2\beta - \Omega = 0 \\ \Omega = \frac{2\pi}{d_0} \end{array} \right\} 2\beta - \frac{2\pi}{d_0} = 0 \Rightarrow \lambda_0 = 2n_{ef} d_0$$

Sólo si la frecuencia de la señal incidente es igual o cercana a la frecuencia de Bragg definida por la ecuación anterior, λ_0 , será reflejada con bajas pérdidas por la red de difracción. En caso contrario será transmitida por ella. Es decir, con este dispositivo conseguimos un filtro en longitud de onda que actúa en reflexión.

Los parámetros que se deben especificar para caracterizar la respuesta en frecuencia de una red Bragg son la longitud de onda central, la reflectividad y el ancho de banda en el que operan. En la figura se puede observar el módulo de la respuesta en frecuencia típica de estas redes.

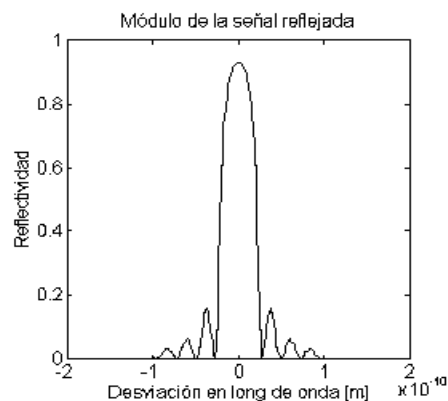


Figura 1.26: Módulo de la respuesta de una red de difracción uniforme

Para evitar la aparición de lóbulos laterales que estropeen la respuesta espectral de la red de difracción se emplean funciones de suavizado que disminuyen el acoplo en los extremos de la red. Las redes de difracción que consiguen la disminución de los lóbulos laterales son las denominadas redes de difracción Bragg *uniformes apodizadas*. Esto evita que se produzcan reflexiones no deseadas y que se creen cavidades resonantes de

tipo Fabry-Perot, responsables de la aparición de lóbulos secundarios. Respuestas típicas de redes con funciones de suavizado son:

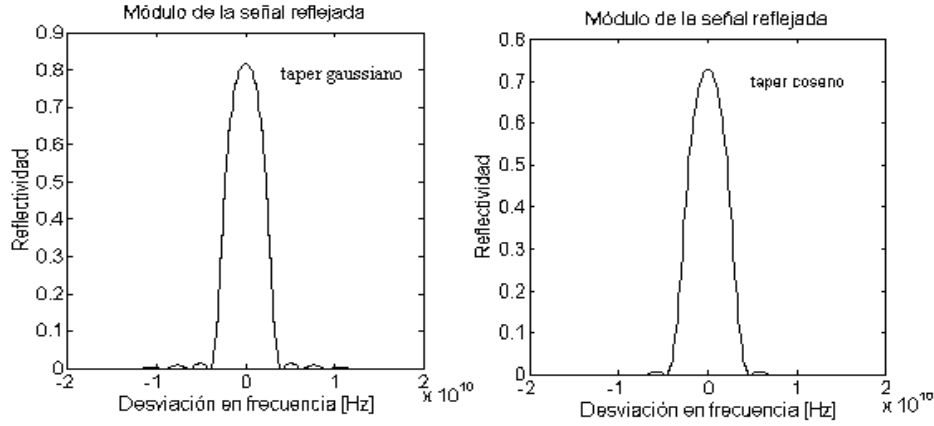


Figura 1.27: Módulo de la respuestas de redes de difracción con distintas funciones de suavizado

Cuando la fibra se somete a un esfuerzo mecánico, el cambio relativo en la longitud de onda Bragg viene dado por:

$$\frac{\Delta\lambda_g}{\lambda_g} = \frac{\Delta(n\Lambda)}{n\Lambda} = \left[\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial P} + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial P} \right] \Delta P$$

Donde Λ es el periodo espacial de la red y n es el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra.

El cambio relativo de la longitud física de la fibra y del índice de refracción viene dado respectivamente por

$$\frac{\Delta L}{L} = -\frac{(1-2\mu)P}{E}$$

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{n^2 P}{2E} (1-2\mu)(2p_{12} + p_{11})$$

Donde E y μ son el módulo de Young y el coeficiente de Poisson de la fibra respectivamente y p_{11} y p_{12} son las componentes del tensor mecánico-óptico.

Se supone que la fibra responde homogéneamente ante fuerzas mecánicas, de ahí su gran utilidad como sensor de presión. El cambio relativo en la longitud física de fibra es igual al cambio en el periodo espacial de la misma. Por tanto, se tiene

$$\frac{\Delta\lambda_g}{\lambda_g \Delta P} = -\frac{(1-2\mu)P}{E} + \frac{n^2 P}{2E} (1-2\mu)(2p_{12} + p_{11})$$

Por otro lado, la sensibilidad de la red ante cambios de temperatura puede expresarse como:

$$\frac{\Delta\lambda_g}{\lambda_g} = \left[\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} \right] \Delta T = (\alpha + \xi) \Delta T$$

Donde α es el coeficiente de expansión térmica de la fibra.

1.7. Aislador óptico

Los aisladores requieren materiales magneto-ópticos para obtener el comportamiento no recíproco necesario. Hay dos tipos de aisladores: dependientes e independientes de la polarización. En este proyecto se han usado aisladores independientes de la polarización con el objetivo de evitar que las reflexiones a la salida del amplificador retornen afectando y desestabilizando a la fuente de bombeo.

Otra de las aplicaciones de los aisladores es su uso en esquemas de amplificadores de fibra para reducir el ASE.

1.8. Multiplexor en longitud de onda

Un multiplexor en longitud de onda (WDM) es un dispositivo pasivo bidireccional. En uno de sus sentidos, combina las longitudes de onda de sus entradas uniéndolas en una sola salida. En el otro, realiza el proceso inverso (de-multiplexor), separando las longitudes de onda entre sus salidas. Los WDM permiten por lo tanto la transmisión simultánea de dos o más señales ópticas independientes y con distintas longitudes de onda que viajaban por caminos distintos. Pueden verse como acopladores selectivos en longitud de onda.

En este proyecto sólo se han utilizado multiplexores de dos entradas y una salida como el que se muestra en la siguiente figura.

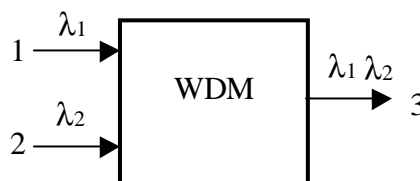


Figura 1.28: Esquema general del WDM

A continuación, mostramos cuales son los parámetros más importantes de un multiplexor:

- Pérdidas de inserción: P_1/P_2 ó P_3/P_2
- Aislamiento o diafonía: cuando el WDM actúa como demultiplexor, este parámetro indica la cantidad de potencia de un canal que aparece en la salida correspondiente al otro.
- Directividad: es la medida de qué cantidad de potencia introducida por la entrada 1 sale por la 3 y viceversa.

1.9. Atenuadores de curvatura

Hay múltiples formas de atenuar una señal que viaja por una fibra óptica. Por el mero hecho de presionar la fibra ya la atenuamos. Pero en nuestro caso, necesitamos algo con más precisión, sensibilidad y más manejable que simplemente ejercer más o menos presión sobre una fibra.

Este tipo de atenuadores, como su nombre bien vaticina, utilizan el efecto de curvar la fibra para conseguir pérdidas en la señal que las atraviesa. Si curvamos la fibra, hay una transmisión de potencia a modos de cubierta que hace que la potencia de la señal que circula por el núcleo baje. Un mayor desplazamiento del tornillo micrométrico conlleva la aparición de una mayor curvatura y por lo tanto de una mayor pérdida.

1.10. Circuladores

Una de las opciones que utilizada en la implementación de cavidades y anillos resonantes, como veremos, es utilizar un circulador con la idea de poder introducir la señal del láser y extraer la señal de respuesta de los *grating*.

Las ventajas que se obtienen de un circulador son sin duda la posibilidad de realizar la operación de Inserción/Extracción de la señal de información sin necesidad de perder tanta potencia de señal como la que se pierde utilizando un acoplador.

El concepto de funcionamiento de un circulador es muy sencillo. En el caso de un circulador de 3 puertos como los utilizados en el proyecto, el proceso es similar a tener un aislador entre cada uno de los puertos. De este modo, la señal que entra por el puerto 1 del circulador sale por el puerto 2, pero la señal que entra por el puerto 2, no puede salir por el puerto 1. De igual modo ocurre con la señal de entrada por el puerto 2 del circulador, saldrá por el puerto 3, pero la señal que entra por el puerto 3 no podrá salir por el puerto 2. Ídem con los puertos 3 y 1.

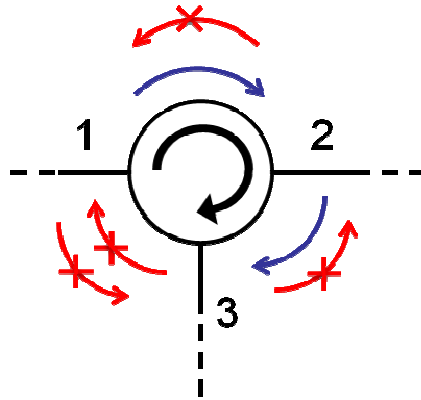


Figura 1.29: Esquema básico de un circulator

Las características principales de un circulator son dos:

- Pérdidas de inserción:

$$P.I. = 10 \log \frac{P_1}{P_2}$$

- Aislamientos o pérdidas de acoplo:

$$Aislamiento = 10 \log \frac{P_2}{P_1}$$

Estas fórmulas se refieren a la conexión entre puertos 1 y 2, de forma análoga se hace para los puertos 2 y 3.

El mayor inconveniente que presentan los circulares, aparte de las pérdidas de inserción, es la señal que se pasa desde el puerto 1 al puerto 3. Este valor suele ser muy pequeño, del orden de 50dB inferior al valor introducido por el puerto 1. Pero en aplicaciones de muy pequeña señal es un factor a tener en cuenta.

El funcionamiento de los circulares está basado en el Rotor de Faraday. De este modo las señales que viajan en un sentido atraviesan el sistema, mientras que las señales que viajan en sentido contrario no pueden atravesar los cristales polarizados debido a que el Rotor de Faraday les ha cambiado la polarización de manera conveniente.

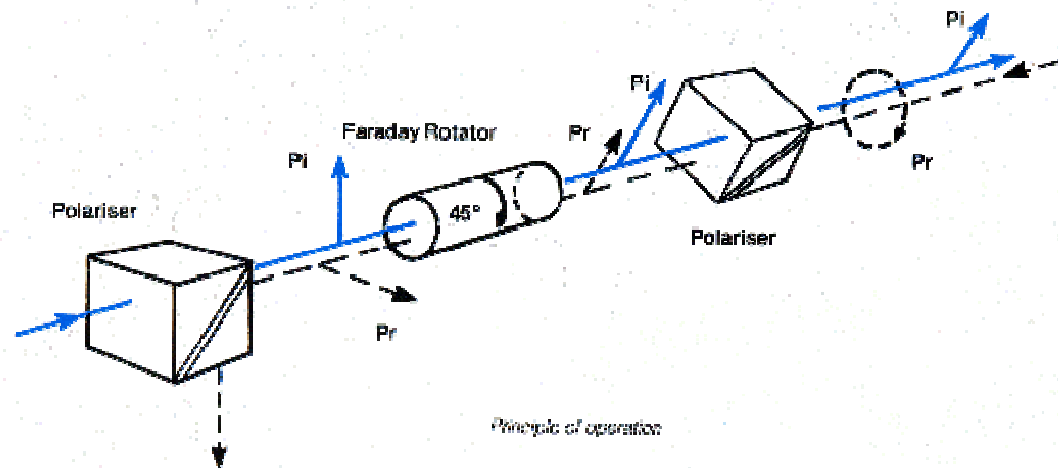


Figura 1.30: Esquema de rotor Faraday

Las ventajas que presentan los circuladores son principalmente 3: disminuyen las pérdidas en la operación inserción/extracción, independencia casi total de la polarización y por último, hace las veces de aislador.

En cuanto a las desventajas que nos podemos encontrar al utilizar un circulador radican en la potencia derivada del puerto 1 al puerto 3. En aplicaciones de pequeña señal esto puede ser un problema. También nos afectará si estamos haciendo detección en el puerto 3, ya que supone una señal parásita que se sumará a la información.

Sección II

Red de monitorización remota con multiplexación de sensores utilizando amplificación Raman y Brillouin

CAPÍTULO II

Descripción de la red de monitorización remota con multiplexación de sensores utilizando amplificación Raman y Brillouin

2.1. Introducción

Las redes de difracción de fibra óptica (*fiber Bragg grating* ó FBG) han atraído gran interés en el campo de la fibra óptica debido a su utilización como sensores. Los sensores de fibra óptica presentan ventajas sobre los convencionales cuando el medio en el que hay que realizar medidas es hostil desde el punto de vista del material en el que hay que insertarlos, o desde el punto de vista electromagnético, de materias explosivas, o al ser embebidos en materiales compuestos.

Entre los sensores de fibra óptica, los citados FBG están cobrando día a día más importancia debido a su simplicidad, dimensiones reducidas, bajo coste, inmunidad electromagnética y su gran capacidad para ser multiplexados. Por tanto, las redes de difracción tienen gran cabida en monitorización de estructuras, actuando como sensores de temperatura, presión, vibración o de tensión [1, 2].

Para esta monitorización se requieren sistemas de interrogación, que permitan obtener el desplazamiento de la longitud de onda del FBG en función del parámetro físico medido, como la temperatura. Las diferentes técnicas de interrogación proveen una alta precisión de los desplazamientos en longitud de onda del sensor, amplios rangos de medida, inmunidad a las fluctuaciones en potencia, capacidad de extensión por multiplexación, simplicidad y bajo coste [3].

Para medir los cambios de temperatura o presión de los FBG, se han creado diferentes tipos de técnicas de interrogación. Los métodos típicos se basan en filtros Fabry- Perot sintonizables [4], interferómetros Mach-Zehnder [5], filtros FBG [6], *Chirped* FBG [7], etcétera [3]. Sin embargo, muchas de las técnicas están basadas en sistemas de medida pasivos que utilizan fuentes de espectro ancho, por tanto las relaciones señal-ruido obtenidas son bajas; además muchos de estos métodos son complejos y caros.

Types	Technologies
Passive detection schemes	Linearly wavelength-dependent device CCD spectrometer Power detection Identical chirped-grating pair
Active detection schemes	Fabry-Perot filter Unbalanced Mach-Zehnder interferometer Fiber Fourier transform spectrometer Acousto-optic tunable filter Matched FBG pair Michelson interferometer LPG pair interferometer
Other schemes	Wavelength-tunable source Mode-locked fiber laser with wavelength-time conversion Optical CDMA correlator Frequency modulation Intra-grating sensing

Tabla 2.1. Diferentes tipos de métodos de interrogación

Últimamente los métodos de monitorización utilizando esquemas con láseres de fibra han sido muy investigados. En general, los láseres de fibra son estructuras de guía onda que pueden tener altas densidades de potencia en el núcleo. El láser de fibra es un dispositivo de guiado de luz en el que éste se realiza en el interior de la fibra y la resonancia se obtiene habitualmente por medio de los dos espejos, lo que equivale a una estructura Fabry Perot.

La generación de luz láser se consigue introduciendo un medio amplificador en lo que habitualmente se llama cavidad láser. Dicha cavidad cumple dos funciones, por un lado confina la potencia de la luz generada por emisión estimulada haciendo que la señal atraviese múltiples veces el medio amplificador y, por otro, determina las frecuencias ópticas de emisión del láser. Hay que tener en cuenta que el origen de la emisión de luz láser se encuentra en la emisión espontánea que produce el medio activo, la cual se amplifica por emisión estimulada en los sucesivos pasos por dicho medio.

Estos métodos de monitorización mediante sensores utilizando esquemas con láseres de fibra en vez de sistemas con fuentes de banda ancha suponen muchas ventajas, como alta sensibilidad, gran relación señal a ruido en medios ruidosos, etc. Además estos últimos esquemas suelen estar limitados a una distancia máxima de 25km debido a la dispersión Rayleigh [1, 8].

Inicialmente se utilizaba amplificación mediante fibra dopada con erbio en este tipo de láseres de fibra [9, 10], aunque también se usa amplificación Raman [2, 11, 12], SOAs [13, 14] o sistemas de amplificación híbridos [15, 16] utilizándose uno u otro dependiendo de la aplicación. La mayoría de los sistemas de sensores de larga distancia basados en láseres de fibra usa amplificación Raman distribuida y sensores FBG [2, 8, 11, 12, 17, 18]. Sin embargo hay pocos sistemas de sensores de distancia “ultra-larga” mediante FBG que alcancen mas de 100km de distancia manteniendo una buena relación señal a ruido [19, 20]. Este tipo de redes de larga distancia es importante en aplicaciones como oleoductos, gaseoductos, estudios sísmicos o prevención de tsunamis [20], debido a las grandes distancias a recorrer y la dificultad de proveer de alimentación la zona donde se encuentra el sensor.

2.2. Estudio preliminar

Por todo lo visto existe la necesidad de encontrar nuevas técnicas para la interrogación de sensores mediante métodos de bajo coste y alta relación señal a ruido. Por tanto, el objetivo de esta sección será encontrar nuevas alternativas para la interrogación de sensores con dos premisas básicas: alcanzar la mayor distancia posible de medida junto con una gran relación señal a ruido. Como se verá, estos dos objetivos están relacionados entre sí y habrá que buscar el compromiso entre ambos, sin perder de vista incluir el mayor número de sensores posibles y que el coste permita la viabilidad del sistema.

Durante todo el proceso de investigación se plantean muchas variantes sobre el esquema planteado inicialmente, que se irán tratando por separado. Sin embargo en este estudio preliminar tan sólo se verá el esquema inicial y cómo el desarrollo de éste desemboca en un nuevo método de interrogación para los consecuentes estudios experimentales.

2.2.1. Montaje inicial

La idea inicial del montaje es crear un sistema de monitorización remoto basado en un láser multilínea de fibra óptica, mediante el uso de sensores FBG, ganancia Raman y Brillouin.

Como se ha visto en la introducción, un láser de fibra óptica requiere una cavidad con dos espejos para provocar la recirculación y cierta amplificación. La cavidad del montaje puede dividirse en dos partes: equipamiento de monitorización y red de sensores en sí misma, separadas ambas por una longitud de fibra monomodo que irá variando y que se pretenderá que sea lo más larga posible como objetivo de la investigación.

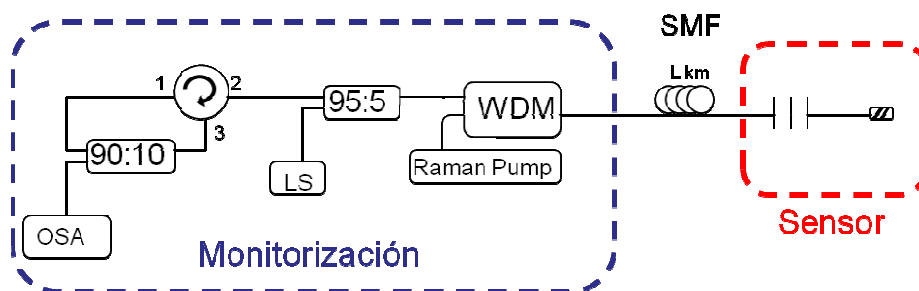


Figura 2.1. Montaje inicial

La red de sensores está compuesta únicamente por los sensores FBG conectados a la fibra monomodo y con gel de adaptador de índice en la salida para evitar reflexiones indeseadas. En la figura 2.1 se ha representado esta red con un único FBG, de manera esquemática, pero como se verá éste puede multiplexarse en longitud de onda con más sensores.

La multiplexación de FBGs puede realizarse en serie o en paralelo:

- **Serie:** La multiplexación de sensores en serie tiene la ventaja de ser más eficiente en términos de potencia, ya que la potencia pasa de uno a otro sensor, perdiéndose la señal no deseada en la adaptación del último de ellos. A cada FBG le llega la potencia que entra a la red íntegra, salvo por la potencia reflejada por los anteriores sensores.



Figura 2.2. Esquema de multiplexación de FBGs en serie

Sin embargo esta configuración tiene un inconveniente. En la práctica cada FBG introduce pérdidas diferentes en cada sensor, lo que complica mucho la ecualización del sistema para que las longitudes de onda reflejadas tengan unas potencias de pico iguales [12].

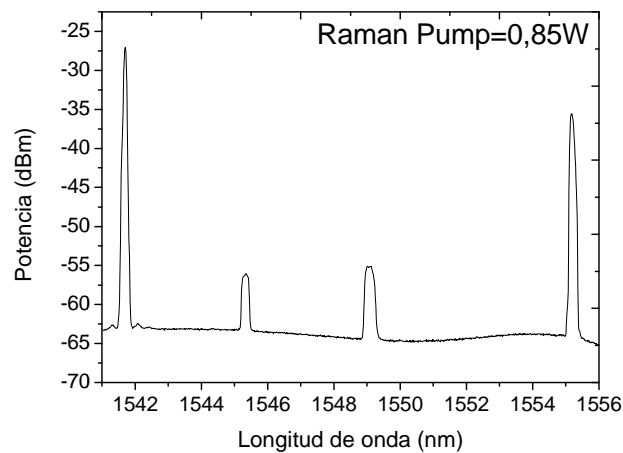


Figura 2.3. Sensores en serie emitiendo sin ecualización.

- **Paralelo:** Al contrario del montaje en serie, la configuración en paralelo permite una fácil ecualización de los diferentes sensores para lograr una respuesta similar en potencia por todos los sensores, con sólo introducir un atenuador variable en cada rama [12]. Sin embargo de esta manera la potencia recibida en cada rama al multiplexar n sensores es n veces menor. Por ejemplo, para multiplexar cuatro sensores, la potencia que llega a cada FBG es cuatro veces menor, es decir, unos 6 dB menos. Esto es muy perjudicial en aplicaciones donde la limitación del sistema se encuentra en la potencia.

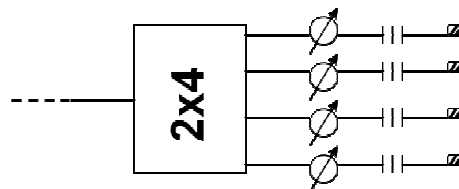


Figura 2.4. Multiplexación de FBGs en paralelo con atenuadores para ecualización.

Tras ver la red de sensores del sistema se estudiará el sistema de monitorización (véase figura 2.1), que puede dividirse en los siguientes subsistemas:

- Un espejo óptico, realizado con un circulador de tres puertos que actúa como uno de los espejos de la cavidad. Incluye un acoplador que extrae parte de la señal para recibirla en el analizador de espectro óptico (OSA). En la figura se extrae un 10% de la señal, pero como se verá en diferentes montajes los acopladores utilizados podrán variar. El OSA se utiliza para recibir la señal y caracterizar el desplazamiento de los sensores en longitud de onda, lo que nos proporcionará la lectura de los propios sensores.
- Un láser de bombeo Raman, cuya finalidad es generar amplificación Raman distribuida en la fibra monomodo del sistema. Este bombeo lo proporciona un láser Raman que emite hasta 3.2 W a 1445nm y se introduce al sistema mediante un multiplexor óptico de longitudes de onda (WDM). Como ya se ha comentado, la ganancia Raman se genera en su mayor parte a una longitud de onda 100nm mayor que el bombeo, por lo que la mayor ganancia se obtendrá en torno a 1545nm, zona donde se colocarán los sensores.
- Un láser sintonizable (1455-1640 nm) con anchura espectral de 100 kHz actuará como bombeo Brillouin y se introduce en el sistema mediante un acoplador 95/5. En el siguiente apartado se verá la necesidad de la ganancia Brillouin en el sistema.

2.2.2. Modo de operación del montaje inicial.

Para crear un nuevo sistema de interrogación de una red de sensores remota, se plantea la idea inicial de utilizar la ganancia Brillouin para conseguir que el sistema actuando como un láser Raman en condiciones de no oscilación alcance el umbral de emisión láser. Es decir, se cumpla la relación $ganancia < pérdidas$ total en la cavidad para las longitudes de onda de los sensores, ya que al superarse el umbral $ganancia = pérdidas$ el sistema generaría una onda láser.

Como ya se ha comentado, una de las características más importantes de la dispersión Brillouin estimulada es la generación de alta ganancia y lo selectivo de esta amplificación, dada la pequeña anchura de línea de su espectro en ganancia. Esta ganancia Brillouin es generada por el láser sintonizable (LS) que barre la zona espectral donde se sitúan los sensores.

Por lo tanto, se pretende que el funcionamiento del sistema sea el siguiente:

- En un primer momento la potencia de salida del LS situado entre 1540 y 1560nm se introduce en la entrada “1550nm” del WDM.
- Esta potencia se suma al bombeo Raman de alta potencia situado en torno a 1445nm y se introduce en la fibra SMF de longitud inicial 100km.

- Como ya se ha comentado, la fibra monomodo puede también ser utilizada para crear amplificación Raman distribuida, ya que aunque posee poca no-linealidad, su larga longitud la hace suficiente. Por tanto, toda señal que circule por la fibra en la longitud de onda de amplificación (en torno a 1545nm) se verá amplificada.
- La selección de las longitudes de onda que resonarán en la cavidad se hace por medio de redes de difracción que actúan como filtros de reflexión. Las redes utilizadas operan dentro de la zona de ganancia del Raman.
- Estas redes de difracción reflejarán selectivamente las longitudes de onda en las que estén centradas, retornando esta potencia selectiva de nuevo por la fibra. A su vez se vuelve a amplificar (contra-direccionalmente esta vez) hasta llegar al puerto número dos del circulador conectado como espejo.
- En el circulador, la señal reflejada se introduce por el puerto dos, cuya potencia pasa al puerto tres, en este se extrae parte de la señal para analizarla en el OSA y el resto se vuelve a introducir en el puerto 1, que la redirige de nuevo al puerto 2 en sentido contrario al de entrada anterior.

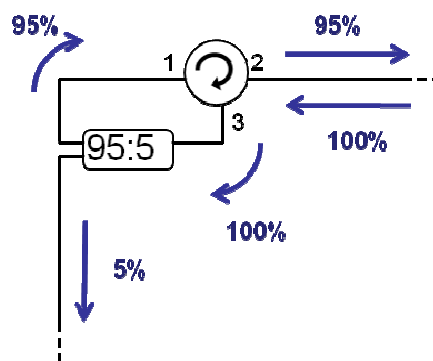


Figura 2.5. Esquema del funcionamiento de un circulador como espejo con un acoplador 95:5 utilizado para extraer la señal de muestra.

- A esta señal se le vuelve a sumar la del LS y el bombeo Raman, vuelve a amplificarse en la fibra, y se repite el proceso.
- La emisión láser se alcanza por el propio funcionamiento del sistema, la potencia de entrada al medio amplificador (SMF) se ve incrementada conforme se produce realimentación, amplificándose gracias a la potencia de bombeo dada hasta que se alcance el estado de saturación, momento en el que el sistema alcanza la estabilidad. Es por tanto el comportamiento del medio activo el que posibilita que la emisión láser tenga lugar.
- La situación inicial consiste, como se ha comentado, en disponer al sistema en el límite de las condiciones de oscilación pero sin llegar a alcanzarla. Es decir, que

la condición de $\text{ganancias} = \text{pérdidas}$ no se alcance para la longitud de onda del FBG, pero que esté muy cerca.

- Una vez dispuesto el sistema en esta situación mediante el ajuste de la potencia de bombeo Raman, se debe ajustar la potencia del láser sintonizable que actúa como bombeo Brillouin. Éste debería generar la suficiente ganancia para que al hacer un barrido sobre la zona de trabajo, el sistema alcance el umbral de emisión láser al cumplirse $\text{ganancias} > \text{pérdidas}$ en la cavidad para la longitud de onda del FBG.
- Al comenzar la emisión láser en el sistema, se debe caracterizar esta señal en el OSA, obteniendo la longitud de onda de la onda láser generada, que en definitiva es la longitud de onda del FBG sensor, cumpliendo con esto la finalidad del sistema.
- Por último, para evitar reflexiones que provocarían inestabilidades en el funcionamiento del láser, todos los conectores que se incluyen en la cavidad son del tipo FC/APC, que presentan unas pérdidas de retorno del orden de 60dB. Además en el extremo libre del último FGB se ha utilizado gel adaptador de índices para evitar reflexiones en las transiciones fibra-aire.

Sin embargo, realizando las pruebas en laboratorio se puede comprobar que la ganancia Brillouin es demasiado selectiva para provocar la emisión láser del FBG ya que éste tiene demasiado ancho de banda (0.2 nm). Lo que se observa es que la onda de Stokes generada por la ganancia Brillouin aumenta en potencia al situarse en la longitud de onda del *grating*, así como la potencia del propio LS.

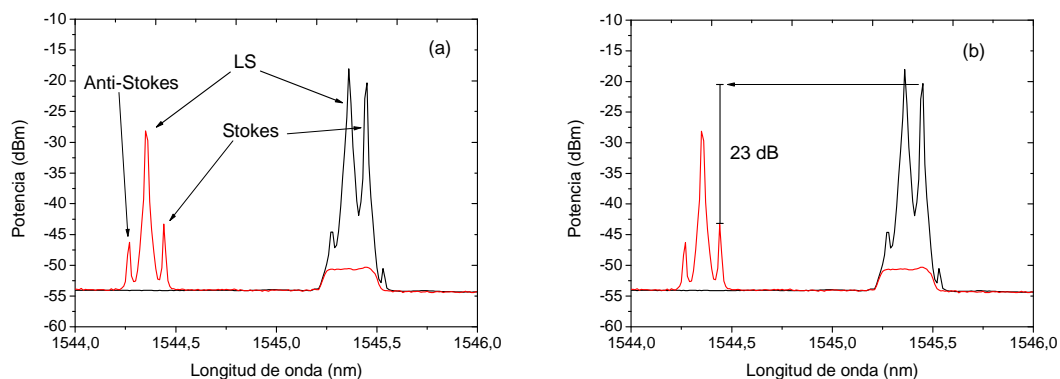


Figura 2.6. (a) Espectro en el OSA con la variación de potencia del LS dentro o fuera de la longitud de onda del *grating*; (b) La diferencia entre las ondas de Stokes dentro y fuera del FBG nos da la medida.

El sistema a efectos prácticos actúa de manera parecida al método de interrogación tradicional mediante barrido con LS, solo que en vez de obtenerse la diferencia de

potencia del propio LS se obtendría la diferencia de potencia de su onda de Stokes, que aunque es considerablemente mayor, no es fácilmente medible.

Contrariamente a lo que se esperaba no es la ganancia Brillouin generada lo que provoca el alcance del umbral de emisión láser del FBG. Ocurre que la colocación del LS y su onda de Stokes en la zona del *grating* provoca el alcance del umbral de emisión láser de la propia onda de Stokes. Esto sucede porque esta zona es una longitud de onda con menores pérdidas debido a la reflexión de la potencia por el FBG. Esto hace que la condición *ganancia=pérdidas* necesaria para la emisión láser se cumpla para la onda de Stokes según se encuentre dentro o no de la longitud de onda del FBG.

Por lo tanto se ha obtenido un nuevo método de interrogación, en el que se puede observar que la onda de Stokes generada por el LS nos daría mayores SNR que el sistema tradicional (Fig. 2.6 (b)), pero el coste del equipamiento y complejidad de esta medida hace que su utilidad y aplicación práctica sean bastante dudosas, por lo que se requiere mejorar el sistema.

2.3. Heterodinaje con Stokes y montaje final.

Se ha obtenido un nuevo método de interrogación que aunque no ha dado los resultados previstos, ha permitido obtener una mejor relación SNR que otros métodos. Sin embargo, éste tiene mayor dificultad para obtener la medida ya que se tiene que medir la potencia de diferencia entre la onda de Stokes dentro y fuera del FBG.

Para evitar esto se ha buscado una solución que permita obtener las medidas de manera sencilla y al ser posible con menor coste.

2.3.1. Heterodinaje con Stokes

Como se indica en el apartado de conceptos teóricos, el heterodinaje es un proceso mediante el cual se superponen dos ondas de frecuencias diferentes (aunque próximas) para obtener una única onda de amplitud dependiente del producto de ambas y a una frecuencia de valor igual a la diferencia de las frecuencias de las ondas que se combinan.

En el caso a tratar, se tiene la señal del LS y la onda de Stokes creada por la dispersión Brillouin separadas en torno a 86 pm a una longitud de onda de 1548 nm. Además están “enganchadas”, de manera que al desplazar el LS su onda de Stokes se desplaza solidariamente. Es sabido que la frecuencia Brillouin (ν_B) y por lo tanto la separación entre el LS y su onda de Stokes no es fija [21], pero su variación en la zona de trabajo es pequeña, variando la diferencia de separación de la onda de Stokes en 1540 y 1555 nm en torno a 180Mhz (1.5 pm), como puede verse en la siguiente figura.

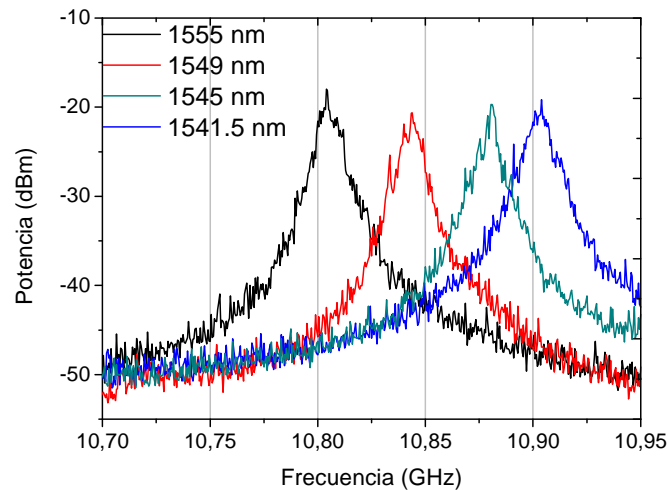


Figura 2.7. Trazas en el ESA del batido obtenido en cuatro sensores de diferentes longitudes de onda.

Por tanto, se puede obtener una única señal procedente del heterodinaje con dos características muy destacadas e importantes aplicaciones:

- Su amplitud depende de la potencia del LS así como de la de su onda de Stokes. Esto permite tener una nueva señal que depende de la de Stokes en potencia, por lo que para ver la variación de la onda de Stokes en función de la longitud de onda solo se tiene que medir la variación en potencia del batido. De esta manera se solventa la dificultad inicial para medir la variación de la onda de Stokes dentro y fuera del FBG.

Además, la señal obtenida de la mezcla depende de la potencia de la onda de Stokes, pero también de la potencia del LS. Por tanto el aumento que tiene la señal del LS al estar dentro o fuera del FBG (Fig.1.7 (a)) también se verá reflejado en la señal obtenida del batido. De esta manera no sólo influye en la SNR del batido la variación de potencia de la onda de Stokes, sino que también influye la variación de potencia del LS al situarse en el FBG.

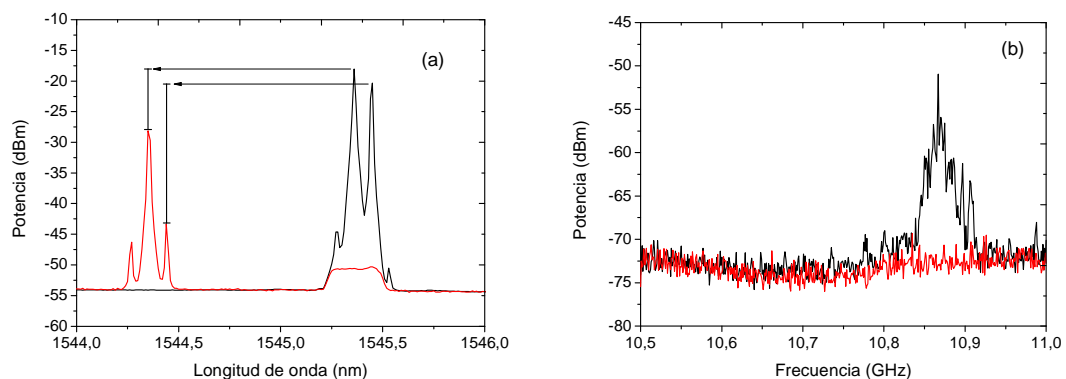


Figura 2.8. (a) Trazas del OSA de cómo tanto la onda de Stokes como el LS aumentan su potencia en el *grating*; (b) Imagen en el ESA de la señal resultante del batido según esté dentro o fuera del FBG.

- La otra gran ventaja es que esta señal debida al mezclado estará situada en torno a 10.875 GHz (86.4pm), que es la separación entre la señal del LS y su onda de Stokes (Fig. 2.8 (b)). Este ejemplo se ha tomado para un *grating* situado en 1545.5, pero varía ligeramente según la posición del FBG.

Es decir, se encuentra en zona de RF por lo que puede visualizarse en el analizador de espectros eléctrico (ESA), sin necesidad de utilizar el OSA. Para ello se utiliza un fotodetector con rango de funcionamiento hasta 12GHz. Este tratamiento eléctrico permite trabajar a una resolución mayor y con mayor precisión.

Por lo tanto, mediante el uso de la técnica de heterodinaje de la señal del láser sintonizable y su onda de Stokes se ha conseguido simplificar considerablemente el sistema de medida. Ahora solo es necesario caracterizar en el ESA la potencia de la señal procedente del batido mientras el LS barre las longitudes de onda próximas al FBG.

2.3.2. Mejora de la SNR

Como se puede ver en la figura 2.8 (a), cuando el LS se encuentra alejado del FBG, también existe onda de Stokes, aunque es menor. Sin embargo en el ESA en ese caso no se percibe señal del batido (Fig. 2.8. (b), traza roja), pese a que debería de existir, aunque sea pequeño.

Se sabe que existe batido pero no se percibe, lo que hace pensar que éste está enmascarado por el ruido del propio fotodetector. En la figura 2.9 puede verse un ejemplo de este efecto, en el que se ha simulado gráficamente cómo una señal está enmascarada por el ruido (traza negra), frente a la misma señal con un ruido de fotodetector mucho menor (traza roja clara). Lo mismo ocurre con las señales con longitud de onda alejada de la del FBG, donde en un caso la señal es solo ruido (traza gris). Sin embargo al reducir el ruido puede verse también algo del batido (azul claro). De esta manera la referencia para la SNR en éste caso es la propia señal del batido al estar fuera del FBG, habiendo ganado el margen entre esta señal y el ruido del fotodetector (detalle).

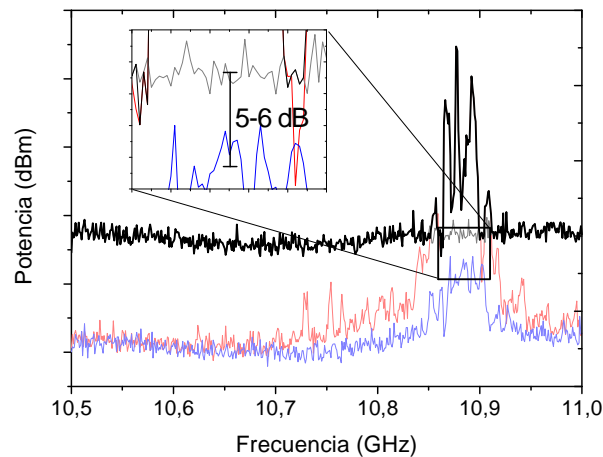


Figura 2.9. Ejemplo de cómo el ruido del fotodetector enmascara a la señal resultante del batido.

Para conseguir aumentar la potencia recibida en el fotodetector y reducir su ruido se prueba a modificar el acoplador introducido en el espejo. Esto permite obtener mayor potencia de señal extraída al ESA, sin embargo esto mismo empeora el funcionamiento del sistema, necesitando más potencia de bombeo Raman. Además esto no permite aumentar la potencia en el fotodetector lo suficiente como para percibir el batido cuando el LS está alejado del FBG.

Se sabe que la potencia de la señal procedente del batido depende tanto de la señal del LS como de su onda de Stokes, por lo que se plantea aumentar la potencia del láser sintonizable, para lograr mayor potencia en el batido.

Sin embargo, al aumentar la potencia del LS se consigue que su onda de Stokes llegue al umbral de emisión láser antes incluso de situarse sobre el FBG, por lo tanto no es posible aumentarla más y esta solución queda descartada.

Otra medida posible es extraer mediante un acoplador parte de la señal de salida del láser sintonizable y acoplarla directamente a la señal extraída en el espejo dirigida al ESA. De esta manera se aumenta la potencia a mezclar del LS, pero sin aumentar la potencia introducida en el sistema. Esto nos permite aumentar considerablemente la señal de batido, permitiendo diferenciar claramente la señal procedente del mezclado tanto si el LS se sitúa en la longitud de onda del FBG o si se coloca fuera.

En la situación inicial la SNR estaba limitada por el ruido del fotodetector (Fig. 2.10 (a)), sin embargo, ahora el sistema tiene como referencia la propia señal mezclada aunque se encuentre fuera de la longitud de onda del FBG (Fig. 2.10 (b)). Esto permite aprovechar el margen de diferencia entre el ruido y la señal mezclada que quedaba oculta en el ruido, mejorando en varios dB la SNR del sistema. Esto puede verse en el detalle de la figura 2.9.

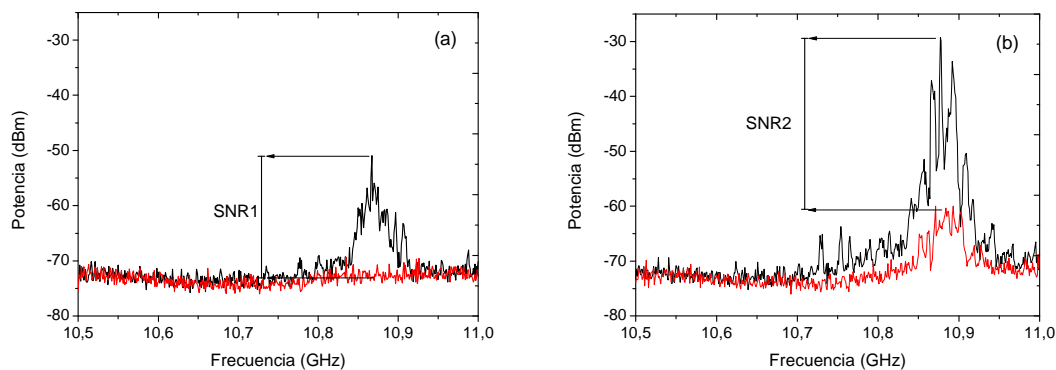


Figura 2.10. Comparación de las SNR del sistema sin utilizar acoplo del LS a la entrada del ESA (a) o utilizándolo (b).

Por último, otra importante mejora del sistema es que al estar trabajando en RF en el dominio eléctrico, este sistema de medida podría implementarse únicamente mediante un receptor óptico a modo de integrador de potencia. Debería estar centrado en 10.825 GHz y con un ancho de banda de unos 250 MHz. De esta manera cualquier batido entre el LS y su onda de Stokes se situaría dentro de la frecuencia de trabajo del receptor. Debido a esto el coste del sistema de medida se reduce considerablemente, siendo prescindible tanto el OSA como el ESA para una aplicación práctica. Sin embargo, en el proceso de laboratorio se utiliza el ESA para simular dicho receptor y el OSA como referencia para estudiar y ajustar el sistema.

En definitiva, se ha conseguido mejorar la relación señal-ruido del sistema mediante la extracción de parte de la potencia de salida del láser sintonizable y sumándola a la señal recibida en el ESA. Este proceso de realimentación consigue aumentar considerablemente el batido entre las señales consiguiendo que la señal efectiva en recepción aumente respecto al ruido. Además mediante este nuevo método de medida se ha reducido en gran parte el coste del sistema, sustituyendo inicialmente el OSA por un ESA, y finalmente éste por un receptor de ancho de banda 250MHz centrado en 10.82 GHz.

2.3.3. Montaje final

Como se ha visto desde el estudio preliminar, sobre la idea inicial del sistema se han introducido importantes modificaciones. Estos cambios han conseguido simplificar el sistema de medida, posteriormente aumentar la SNR y reducir el coste del equipamiento, desembocando en un montaje final que será la base para los estudios experimentales.

En estos estudios se implementaran modificaciones para aumentar la distancia de interrogación del sistema, así como aumentar el número de sensores multiplexados. Sin

embargo, todas estas modificaciones tendrán como base el montaje descrito a continuación.

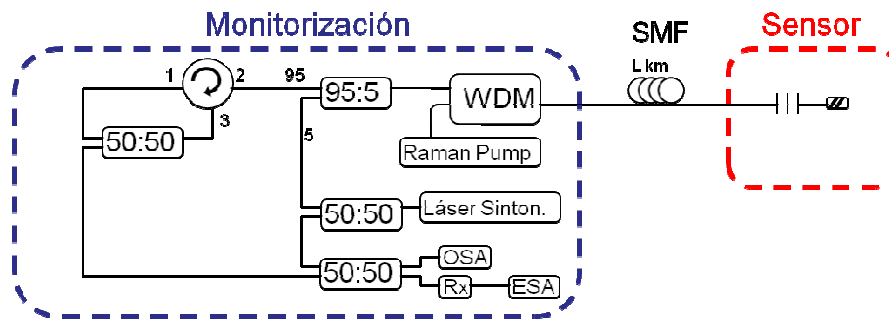


Figura 2.11. Montaje final

El montaje es en esencia similar al comentado en el estudio preliminar, salvo por las siguientes modificaciones:

- A la salida del láser sintonizable se coloca un acoplador 50:50 para separar la potencia en dos partes iguales: la primera se introduce en el sistema, mientras que la segunda se sumará a la potencia extraída del espejo.
- Se ha colocado un acoplador 50:50 para sacar del circulador a modo de espejo la potencia suficiente que permita medir con eficacia en el ESA. Aunque más adelante se estudiará la variación de este valor de acoplamiento.
- La salida de este 50:50 se suma al 50% de la potencia de salida del láser sintonizable. Ésta a su vez se introduce en otro acoplador 50:50 que separa en partes iguales la potencia para ser analizada tanto en el ESA como en el OSA.
- La salida del acoplador correspondiente al ESA se conecta al fotodetector y éste al ESA.

Una vez estudiado el sistema, su funcionamiento y su montaje, se pasará a estudiar los resultados experimentales de las diferentes pruebas y modificaciones aplicadas a este montaje final, con el objetivo de multiplexar el mayor número posible de sensores y alargar al máximo la distancia alcanzable por el sistema.

CAPÍTULO III

Resultados experimentales del sistema de monitorización remoto a 100 km.

3.1. Introducción

En este capítulo, se presenta el estudio llevado a cabo para la realización, desarrollo y mejora del sistema de monitorización remoto expuesto en el capítulo anterior para una longitud de 100 Km. Aquí se detallará el ajuste del sistema así como la prueba de diferentes modificaciones buscando tanto la mejora de la SNR del sistema como la inclusión del mayor número posible de sensores. También se comparará el funcionamiento del sistema con los métodos tradicionales, y se ratificará su utilidad para el uso de sensores de temperatura.

El material utilizado para la realización de las pruebas de este capítulo ha sido el siguiente:

- Analizador de espectros óptico (OSA) AdvanTest Q8384
- Analizador de espectros eléctrico (ESA) R&S FSP30 (1093.4495.30)
- Fotodetector NewFocus 1544B
- Láser de bombeo Raman IPG RLD-3k-1445
- Láser sintonizable Agilent 8164B
- Cámara climática Binder
- Sensor de temperatura VAISALA HMP75
- Ordenador personal con el software Labview
- Redes de difracción Bragg centradas en 1541.5nm, 1545nm, 1555.1nm con una anchura de 0.23nm, 0.27nm, 0.29nm respectivamente y reflectividad del 99%.
- Red de difracción Bragg variable entre 1545-1555nm con una anchura de 0.39nm y reflectividad del 99%.
- Circuladores de tres puertos.
- Multiplexor de longitud de onda (WDM) 1445nm/1550nm
- Acopladores de 50:50, 90:10, 95:5.
- 100Km de fibra monomodo estándar TELNET
- Atenuador variable
- Controlador de polarización.
- Interrogador de sensores comercial SMARTEC SM125
- Red de difracción Bragg de periodo largo en 1550 nm
- Filtro sintonizable Dicom tf-1550-0.8-9
- Acoplador 2x4 TELNET
- Gel adaptador de índice

El montaje sobre el que se comenzará el estudio será el visto en el capítulo anterior, pero con las siguientes modificaciones iniciales:

- Inserción de un atenuador variable en la rama del láser sintonizable que se introduce en el sistema. Esto nos permite un control más sencillo de la potencia

del LS inyectada al sistema de cara a conseguir optimizar la onda de Stokes generada.

- Inclusión de un controlador de polarización tras el atenuador variable para controlar la polarización del láser sintonizable introducido en el sistema. Esto nos permite ajustar el punto óptico donde la ganancia y la interferencia es máxima, para lograr mejores resultados.

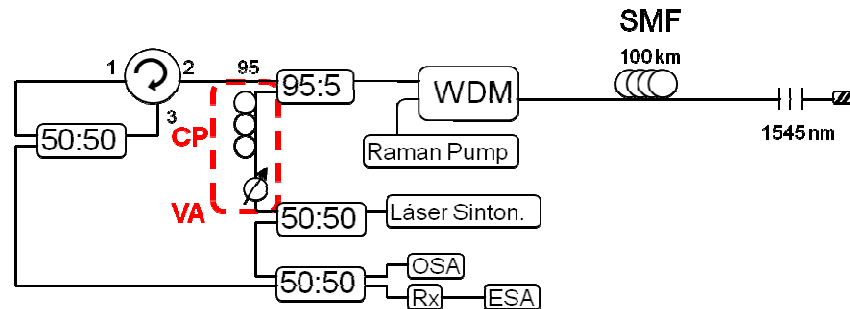


Figura 3.1. Montaje inicial con control de polarización y atenuador variable.

Como se ha comentado en el capítulo anterior, el acoplador situado en el anillo puede modificarse para variar las condiciones de emisión láser del sistema, pero con un compromiso respecto a la potencia extraída. Por tanto el primer paso en el estudio será realizar una comparación para seleccionar el acoplador más adecuado para nuestro montaje.

3.2. Estudio del sistema según la potencia recirculada en el espejo.

En este apartado se estudia la variación de la respuesta del sistema según la potencia recirculada en el espejo, variando el acoplador utilizado para extraer la potencia necesaria para el análisis tanto en el ESA como en el OSA.

Se estudian los montajes para una recirculación de potencia de un 5, 50 y 95%, viendo las ventajas e inconvenientes en cada caso.

3.2.1. Recirculación del 5%

En este sub-apartado se realizan pruebas usando una recirculación del 5% de la potencia introducida en el anillo.

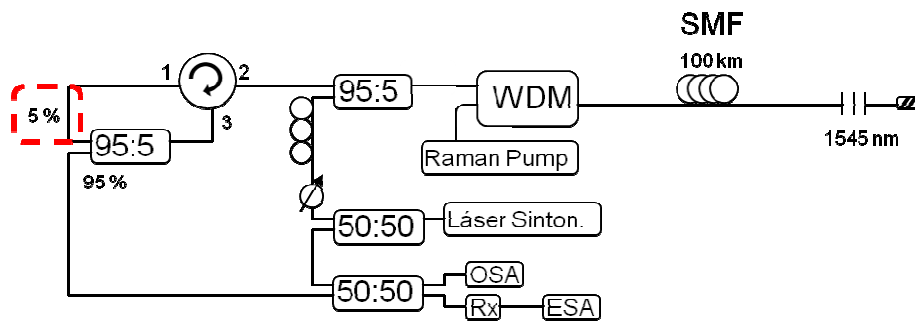


Figura 3.2. Montaje para recirculación de un 5% de la potencia.

En este caso, como se ha comentado en el estudio preliminar, puede observarse la señal procedente del heterodinaje en todo momento debido a la “realimentación” de potencia del láser sintonizable, se encuentre éste dentro del ancho del FBG o no (Fig. 3.3 (b)).

En la figura 3.3 (a) puede verse respecto a otras trazas anteriores recogidas en el OSA cómo la potencia del LS no cambia al situarse éste en el *grating*. Esto se debe a que en el OSA se introduce la misma señal que llega al ESA, es decir, se ve la señal recirculada en el sistema más la señal del LS introducida directamente para aumentar la potencia del batido. Como esa señal es de mayor potencia que la extraída del sistema y ésta no varía, nos enmascara la señal del láser sintonizable extraída del sistema, no así la de su onda de Stokes.

En la figura 3.3 (b) se puede ver que la SNR estimada en el ESA alcanza unos valores de en torno a 25-30 dB para una potencia de bombeo Raman de 1,15 W, cuando la potencia de LS introducida en el sistema se ajusta mediante el atenuador variable para un funcionamiento óptimo.

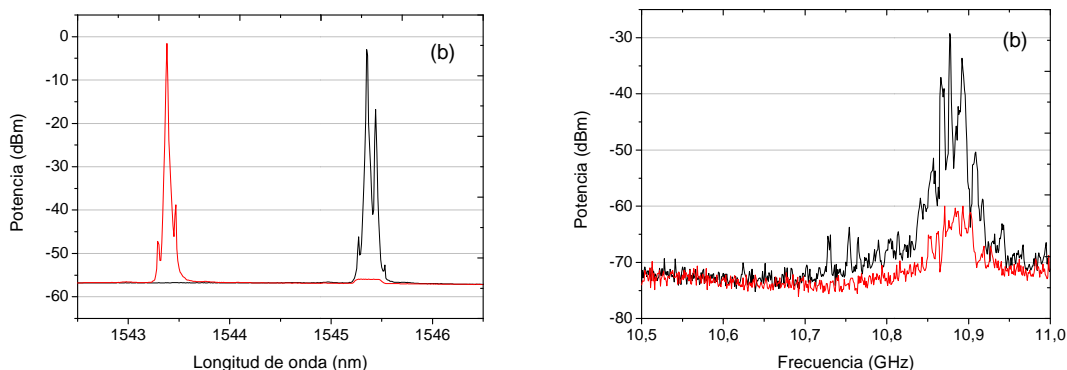


Figura 3.3. Mediciones en OSA (a) y ESA (b) para recirculación del 5%

3.2.2. Recirculación del 50%

En este sub-apartado se realizarán pruebas para una recirculación del 50% de la potencia introducida en el anillo.

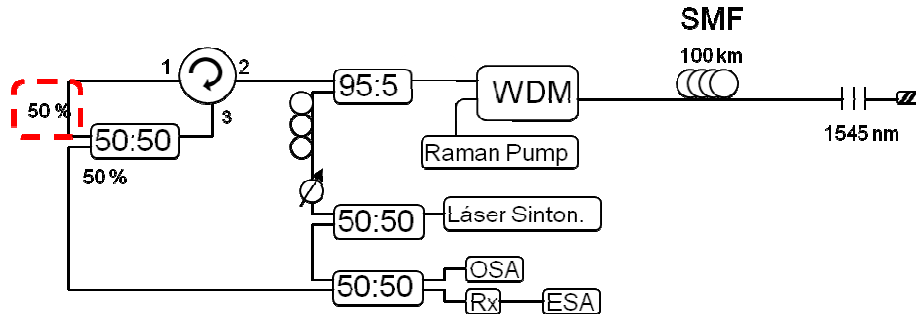


Figura 3.4. Montaje para recirculación de un 50% de la potencia

Se puede ver en estas medidas (Fig. 3.5) como la relación señal-ruido anterior se conserva. Sin embargo esta vez las medidas se han tomado con una potencia de bombeo Raman de 1W frente a los 1,15W de la medida anterior. Esto supone un ahorro en el bombeo de 15 mW lo cual es muy beneficioso para el sistema ya que permitirá utilizar mayor potencia más adelante, para lograr mayores distancias en la red y/o aumentar el número de sensores multiplexados.

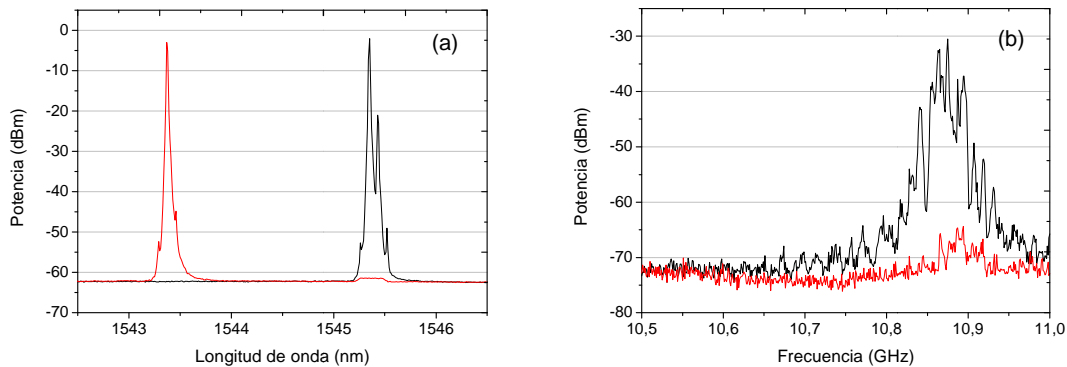


Figura 3.5. Medidas en OSA (a) y ESA (b) para recirculación del 5%

3.2.3. Recirculación del 95%

Con este montaje se busca reducir aún más la potencia de bombeo Raman recirculando el 95% de la potencia en vez del 50% del montaje anterior.

En las pruebas realizadas en el laboratorio puede verse que debido a la realimentación de potencia del LS se consigue tener suficiente señal en el ESA. Esto permite de nuevo mantener la SNR del sistema en torno a 25-30dB para una potencia de bombeo Raman de 0,94W. Por tanto, se ha vuelto a reducir la potencia de bombeo inyectada en el sistema manteniendo las cualidades del montaje.

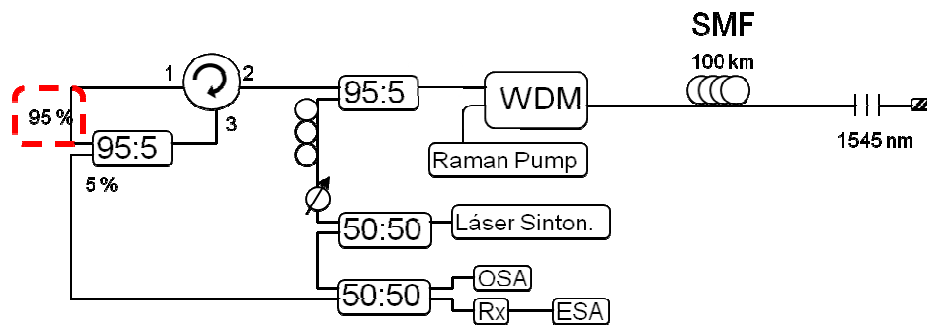


Figura 3.6. Montaje para recirculación de un 50% de la potencia

Por tanto, se puede ver cómo debido a la “realimentación” del LS a la entrada del ESA se obtiene tal aumento de la señal resultante del heterodinaje que puede recircularse hasta el 95% de la potencia sin que el sistema pierda sus características. A partir de ahora se mantendrá la configuración en la que se recircula el 95%

3.3. Proceso de medida y simulación del receptor

Se ha visto que el sistema se analiza mediante un OSA, que sirve para ajustar los parámetros; y un fotodetector conectado al ESA para realizar las medidas. Sin embargo, para la implementación práctica del sistema es suficiente con un fotoreceptor a modo de medidor de potencia, que integre la potencia en un ancho de banda de 240 MHz centrado en 10.825MHz.

Esto, como ya se ha explicado, permite integrar la potencia generada por el heterodinaje del LS y su onda de Stokes, desde 1540nm hasta 1555nm, zona en la que se colocan los sensores. Esta zona es elegida debido a su gran ganancia y la forma de la misma, que es la más plana que el resto.

Por tanto, debe simularse este receptor para la realización de las medidas de manera más sencilla, precisa y sobre todo más cercana a su aplicabilidad como sistema real de medidas de campo. Para esto se utilizan opciones avanzadas en el ESA, configuración de barrido en el LS y creación de un programa de software en Labview para gestionar los datos mediante GPIB.

3.3.1. Proceso de medida

El proceso para la realización de medidas es el siguiente:

1. Inicio del barrido del láser sintonizable en la zona de trabajo.
2. A cada paso del barrido, el LS envía una señal de disparo al ESA.
3. El ESA realiza un refresco de la señal de entrada con cada señal de disparo (tarda en refrescar 20ms).

4. A cada refresco el ESA realiza la integración de la potencia en la zona de trabajo (10.825GHz) para el ancho de banda seleccionado (240MHz)
5. Mediante GPIB, el software de Labview recibe el valor de la potencia solicitada al ESA a cada paso con la longitud de onda correspondiente.
6. Al finalizar el barrido, el programa genera un archivo de texto con los datos obtenidos.

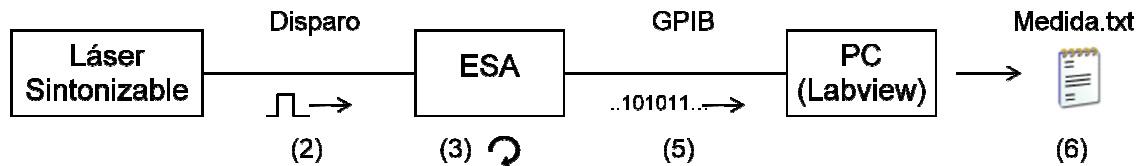


Figura 3.7. Esquema paso a paso del proceso de medida

3.3.2. Software en Labview

El software creado en Labview cumple básicamente dos funciones:

- Configurar el ESA para la consecución de los valores de las medidas a cada paso del LS. Este proceso se realiza al inicio de cada barrido.
- Recoger uno a uno los valores de cada paso del LS y guardarlos en un archivo de texto junto con las longitudes de onda correspondientes.

Las comunicaciones del programa se realizan únicamente con el ESA, mediante GPIB. El funcionamiento detallado y esquema del programa puede verse en el Anexo

3.3.3. Configuración del analizador de espectros eléctrico (ESA)

Para realizar el proceso de integración es necesario configurar adecuadamente el ESA de la siguiente manera:

- En primer lugar, de manera habitual, debe centrarse el *span* del ESA en 10.825 GHz y su ancho de banda en 250 MHz.
- Debido a la relativamente baja potencia de la señal recibida en el ESA, se configura la atenuación de RF de entrada del detector a 0 dB.
- Se debe crear un canal y configurarse su ancho de banda en 240 MHz. El propio ESA integra a cada refresco la potencia de la señal de dentro del canal dando un valor total de potencia.
- Por último se configura el sistema para que sólo refresque la señal de entrada y por tanto la potencia integrada, con cada señal de disparo del LS.

Toda esta configuración se realiza automáticamente mediante el programa de Labview, que al iniciar el proceso de medida ajusta los valores mediante comunicación GPIB.

También se plantea la idea de utilizar algún tipo de opción de promediado permitida por el ESA. Se trata del promediado de traza y de detector (*trace* y *detector average*). Se realiza un barrido probando las diferentes opciones.

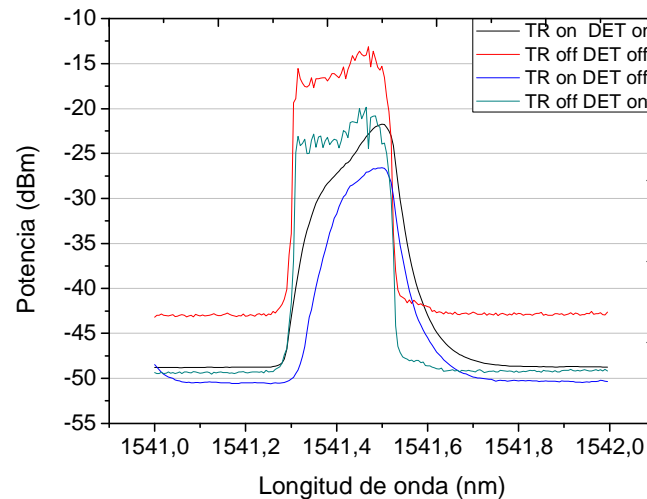


Figura 3.8. Prueba para los diferentes tipos de promediado

Sin embargo, se puede ver que el FBG queda mejor definido sin las opciones de promediado o con sólo el promediado del detector. Por más simplicidad y sencillez en el sistema receptor simulado se opta por no activar ninguna de estas opciones.

3.3.4. Configuración del láser sintonizable

El láser sintonizable utilizado permite varias configuraciones de barrido, que deben ser estudiadas para conseguir la optimización del sistema. Además el sistema debe configurarse para que envíe una señal de disparo a cada paso del barrido. También debe configurarse la longitud de onda inicial, la final, el tipo de barrido realizado o bien paso a paso, o bien continuo, el tiempo que permanece en cada paso y el salto de cada paso.

El tipo de barrido se configura en “paso a paso”; para el barrido de prueba de un FBG situado en 1541.4 nm se inicia el barrido en 1541nm y se finaliza en 1542nm. El tiempo de espera en cada paso (*dwell time*) estudiado es 0, 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 s. El paso (*step*) tiene una longitud de 5, 10, 20, 30 pm.

Las pruebas se han obtenido con el nuevo sistema de medida mediante Labview. Para mayor simplicidad en la realización de las pruebas se ha activado la función de promediado en el ESA.

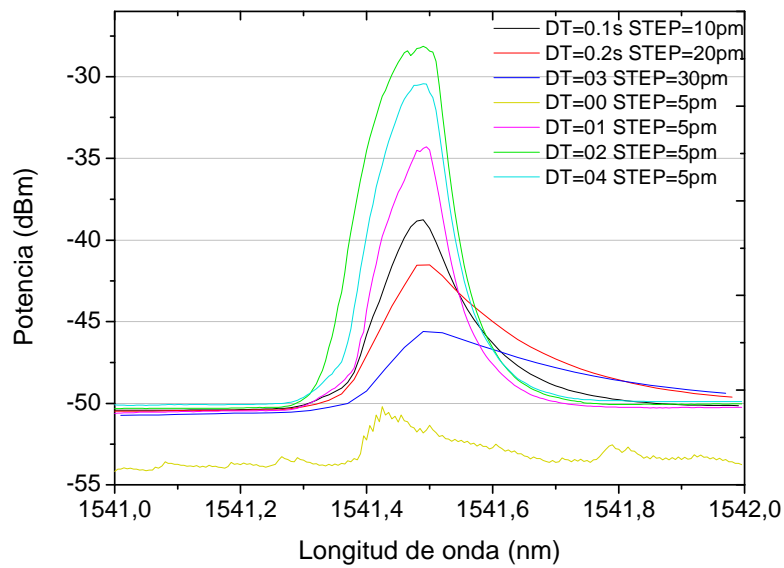


Figura 3.9. Trazas obtenidas según la variación del *dwell time* y el *step*

En la gráfica de resultados pueden verse las pruebas más significativas, según el *dwell time* (DT) o el paso (STEP). Algunos casos son directamente descartables, como la utilización del tiempo de espera en cada paso de 0s, ya que al no detenerse, no da tiempo a recircular a la señal en el sistema, y por tanto no permite generar la onda de Stokes. Tampoco se utilizarán pasos de 20 y 30pm ya que son pasos demasiados largos. Esto influye en la precisión del sistema de medida ya que la variación de longitud de onda del FBG en función de la temperatura es aproximadamente de 11pm/°C. Por tanto con paso de 20 o 30pm se tendría una precisión de 2 o 3°C respectivamente.

De ahora en adelante se utilizan para todas las medidas pasos de 5 o 10pm para *dwell time* de 0.1 y 0.2s. Estos parámetros se modifican en función de la precisión que se requiera así como del tiempo que se espere invertir en la medida, ya que duplicar el paso es dividir por dos el número de puntos y por tanto el tiempo de barrido. De la misma manera aumentar el tiempo de espera en cada paso es aumentar el tiempo de la medida. Esta vez duplicar el *dwell time* no es duplicar el tiempo de la medida, ya que el tiempo que el sistema en cada paso depende también del tiempo que tarda el láser en desplazarse (en torno a 0.1s) en cada paso.

De esta manera podría estimarse el tiempo de simulación de la siguiente manera:

$$T = N \times (t_{DT} + t_{step})$$

T = Tiempo de barrido total

N = número de pasos del barrido

t_{DT} = *dwell time*

t_{step} = tiempo que tarda el LS en dar un paso

En definitiva, se ha simulado mediante el uso de software y del ESA el receptor necesario para realizar las medidas de temperatura en el sistema. De la misma manera se han ajustado los parámetros necesarios en los sistemas para la toma de éstas, según la precisión y tiempo que se considere oportuno.

Ahora las medidas pueden realizarse de manera más precisa, rápida y sencilla; además se ha pasado de analizar la calidad del sistema de manera cualitativa a poder hacerlo cuantitativamente.

En la figura 3.10 (c) puede verse el resultado de barrer un FBG en 1545nm con el nuevo sistema de medida. Cada punto generado en la traza (Fig. 3.10 (c)) procede de la integración de la potencia dentro del canal creado (zonas no sombreadas en (a) y (b)) para cada paso del barrido del LS. Puede verse cómo las trazas de referencia que se tomaban anteriormente dificultaban mucho la medida del sistema, haciendo que fuese muy imprecisa la medida de la calidad del sistema. Sin embargo ahora puede verse de manera sencilla la SNR del sistema.

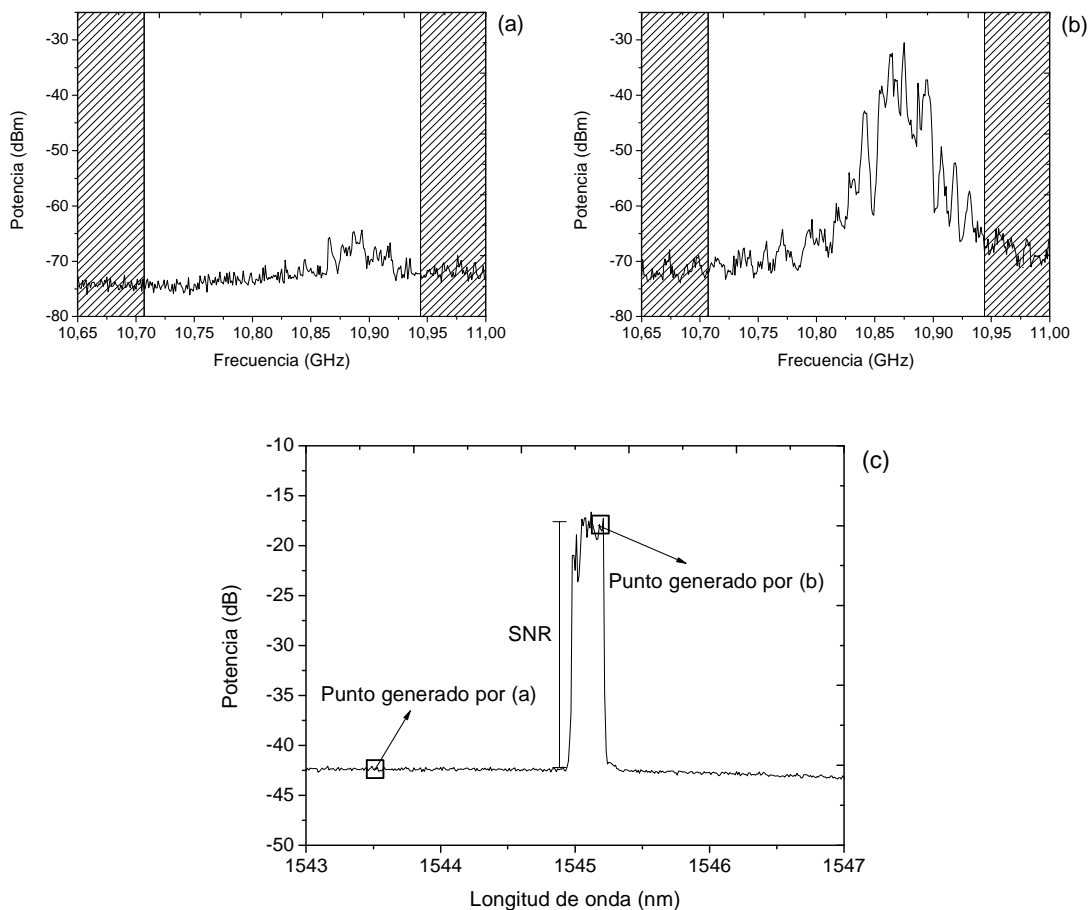


Figura 3.10. Proceso de generación de la medida.

3.4. Multiplexación de sensores

Como se sabe, una de las características más importantes de las redes de sensores remotas es incluir el mayor número de sensores posible simultáneamente. En este apartado se estudia la capacidad de multiplexación de sensores del sistema, el número de sensores incluidos así como la colocación de estos, o bien en serie o en paralelo.

3.4.1. Configuración en paralelo

Para realizar el montaje se incluye un acoplador 2x4 con cuatro sensores FBG conectados. Estos FBG están centrados en 1541.5, 1545, 1549 y 1555 nm, situados en la zona elegida para los sensores, ocupando la zona más plana del espectro de ganancia Raman.

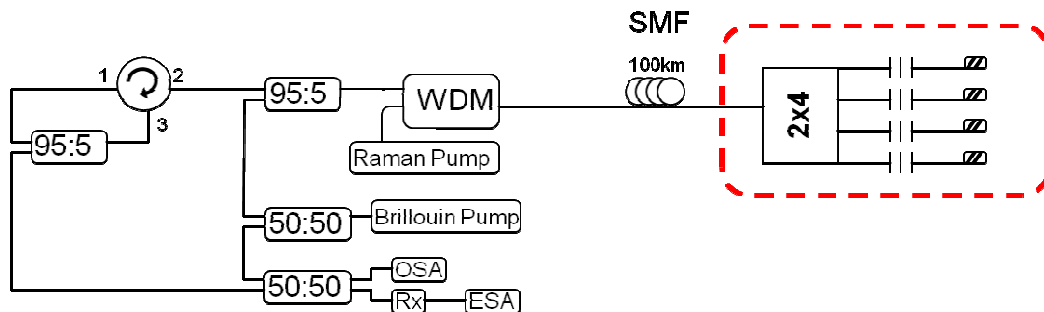


Figura 3.11. Esquema del montaje para cuatro sensores en paralelo.

El problema que se encuentra es que cada FBG recibe cuatro veces menos potencia, es decir 6 dB menos, por lo que debe aumentarse el bombeo Raman para generar la ganancia suficiente.

Por tanto, se observa que la potencia que se necesita para alcanzar los FBG es demasiado alta, lo que provoca la deformación del espectro de ganancia Raman. Esto implica que haya longitudes de onda $\lambda \neq \lambda_{\text{FBG}}$ donde la ganancia sea mayor que en la propia λ_{FBG} . Esto imposibilita la localización del sensor, lo que en estos parámetros hace perder el interés en este montaje.

Además, una de las principales ventajas del montaje en paralelo es la capacidad de ecualización independiente de cada rama. Esto supone que todos los FBG pueden recibir la misma potencia mediante la atenuación de cada rama independientemente. Esto es una aplicación importante para los láseres de fibra, pero en el caso visto al no llegar el sistema al límite de la emisión láser, no influye. Además esta ecualización supondría aún mayores pérdidas, debido a la presencia y ajuste del atenuador variable en cada rama.

Por tanto queda descartado este tipo de multiplexación para la red de sensores, ya que limita demasiado la potencia (por tanto el alcance). Además su mayor ventaja carece de interés en la aplicación del montaje como red de sensores remota.

3.4.2. Configuración en serie

Como se ha dicho en el estudio preliminar, la configuración en serie, al contrario que en paralelo tiene la ventaja de una mayor eficiencia en potencia. Esto es así ya que la potencia que llega a cada sensor es prácticamente la misma, salvo la porción reflejada por el FBG anterior. En cualquier caso esta potencia reflejada en un sensor no influye al comportamiento del siguiente ya que se encuentra en una longitud de onda diferente.

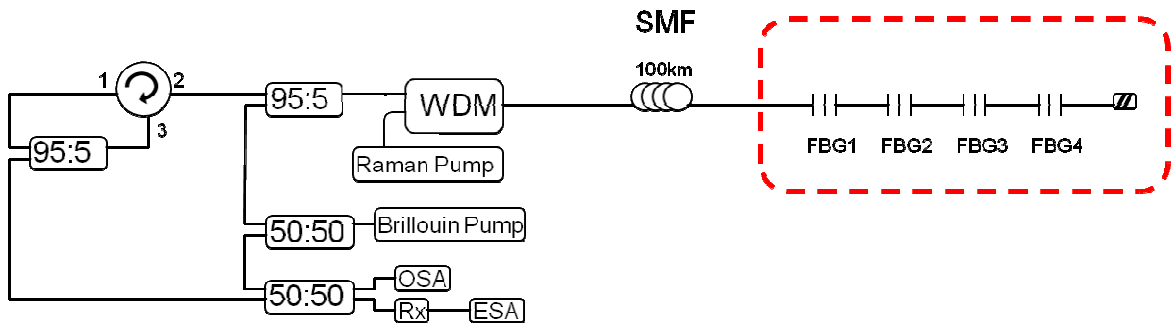


Figura 3.12. Esquema con multiplexación en serie.

De nuevo los FBG usados están situados en 1541.5, 1545, 1549 y 1555 nm y se colocan en serie uno detrás de otro. Para comprobar su utilidad se realiza un barrido desde 1541 hasta 1556nm, con pasos de 10 pm y *dwell time* de 0.1s.

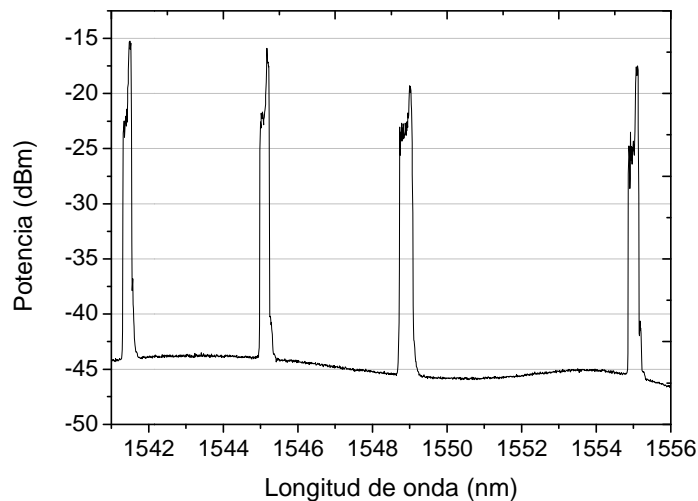


Figura 3.13. Barrido del esquema con cuatro sensores en serie.

Como puede verse en la figura, aunque con ciertas irregularidades, todos los sensores se distinguen correctamente con una relación señal a ruido de entre 25-30 dB si se tiene como referencia el flanco de bajada, resultado más que aceptable. Estas

irregularidades pueden deberse a la falta de un ajuste preciso del sistema, de la relación entre la señal del LS y el bombeo Raman, así como del correcto ajuste del control de polarización.

Sin embargo, a falta de un ajuste preciso se ha comprobado la viabilidad del sistema, y se ha visto que los problemas de ecualización que existen en los láseres multilínea con configuración en serie no se producen aquí, al no llegar al límite de emisión láser.

Por tanto, el tipo de multiplexación utilizada será ésta, para cuatro sensores, aunque podría extenderse a más, siempre que estuvieran situados en una zona no ocupada y que tenga la suficiente ganancia. Además habría que prever los rangos de trabajo de los FBG para optimizar el número de sensores. En cualquier caso, con cuatro sensores repartidos en la zona de trabajo queda demostrada la viabilidad del esquema.

3.5. Optimización del sistema

Como se ha visto, el sistema permite la interrogación de los cuatro sensores FBG con una buena relación señal-ruido, pero sin embargo falta ajustar el sistema para un funcionamiento óptimo. Para esto, se debe buscar la configuración en la que el sistema obtenga la mayor SNR para la respuesta más estable posible. Los parámetros a ajustar son los siguientes, en este orden:

- Limpieza y optimización física del montaje.
- Ajuste del control de polarización.
- Ajuste de la potencia de bombeo Raman y potencia de LS introducido.
- Ajuste de los parámetros del barrido (*dwelt time* y paso).

3.5.1. Limpieza y optimización física del montaje

Se analizó el sistema mediante un OTDR (*optical time-domain reflectometer*) para optimizarlo. Se observó cómo los conectores entre los dos carretes de 50 km de SMF introducían pérdidas y cierta reflexión. Por tanto se optó por realizar una soldadura entre ellos. De la misma manera se suelda la conexión WDM-SMF.

Por último se realizó la limpieza de las conexiones de todo el sistema.

3.5.2. Ajuste del control de polarización.

Para cada barrido que se realice se ajusta el control de polarización buscando el punto en el que el heterodinaje dé una mayor potencia. La influencia del control de polarización es relativamente alta, con una variación de hasta 8 dB en la SNR final. Esto puede deberse a que al introducir parte de la señal del LS directamente al detector, las diferentes polarizaciones entre ésta y la que proviene del sistema generan una interferencia más constructiva o menos en función de las polarizaciones de cada una.

3.5.3. Ajuste de la potencia de bombeo Raman y potencia de LS.

Debido a las mejoras en el ajuste y soldaduras anteriores se comprueba que el sistema tiene un mejor comportamiento. Para lograr la misma respuesta del sistema antes era necesario entre 0.9-1 W, sin embargo ahora el sistema se comporta igual en el rango 0.75-0.85 W. Esta reducción del bombeo es importante de cara a una futura prolongación del enlace.

Para estudiar el mejor caso para el bombeo se realizan diferentes pruebas para diferentes bombeos. En cada caso se debe ajustar manualmente la potencia del LS mediante el atenuador, ya que si se aumenta el bombeo dejando fija la potencia del láser, aumenta la ganancia de la potencia del LS en el sistema y de su onda de Stokes. En ese caso, si se aumenta el bombeo Raman lo suficiente puede alcanzarse el límite de emisión láser de la onda de Stokes sin situarse sobre el sensor, lo que desvirtúa las medidas.

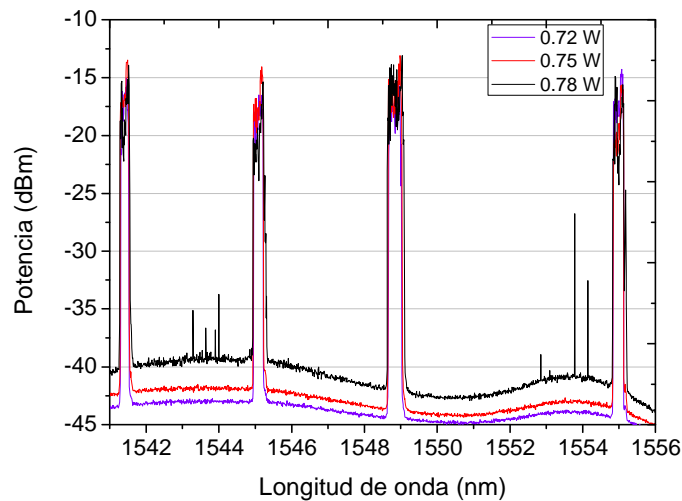


Figura 3.14. Barrido para variación de bombeo sin variar la potencia del LS.

Como se puede observar en la figura, al aumentar el bombeo sin atenuar el LS, llega un momento (con un bombeo de 0.78W) en el que la onda de Stokes provoca emisión láser sin situarse dentro del FBG. Esto ocurre en las zonas donde el perfil de ganancia Raman es mayor, y por lo tanto la condición $ganancia = pérdidas$ necesaria para la emisión láser se cumple para la onda de Stokes.

También puede verse cómo al aumentar el bombeo Raman aumenta el nivel de ruido producido por el heterodinaje del LS y su onda de Stokes, aunque ésta no haya llegado al umbral de emisión. Además este perfil de ruido va acentuándose debido a que el perfil de la ganancia Raman es menos plano conforme se aumenta la potencia de bombeo.

Por tanto se ve que es necesario el ajuste del LS mediante el atenuador para cada potencia de bombeo, buscando el nivel óptimo manualmente en cada caso. De esta manera se han realizado medidas para diferentes potencias de bombeo, buscando la más adecuada para la toma de trazas.

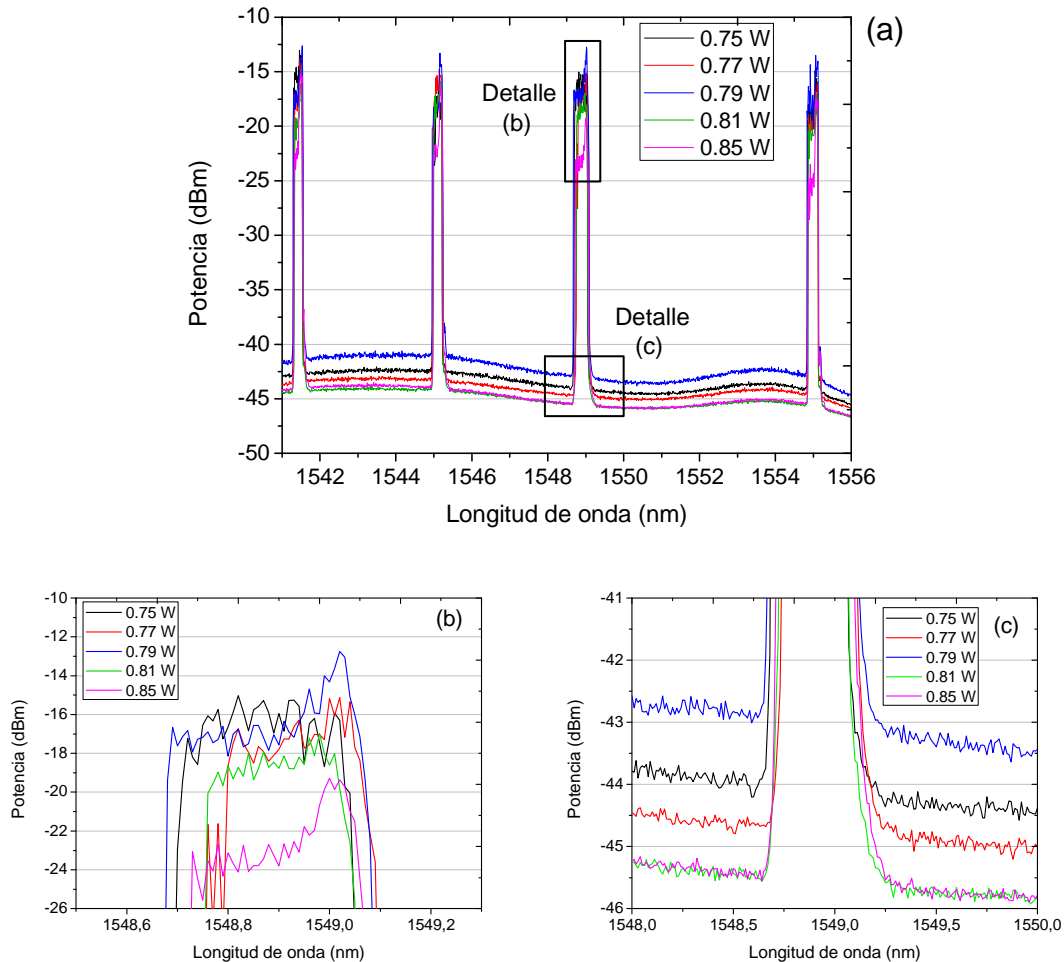


Figura 3.15. Barrido para diferentes potencias de bombeo (a) con detalles del pico del sensor situado en 1549nm (b) y del perfil de ruido (c)

Se ha realizado el barrido para las potencias de 0.75, 0.77, 0.79, 0.81 y 0.85W ajustando en cada caso la potencia del LS buscando la mayor SNR posible. Puede verse que en general la mayor potencia en el sensor se consigue para el bombeo de 0.79W, sin embargo a su vez es el que más ruido tiene. Además se observa que el ruido ya no es proporcional a la potencia de bombeo, sino que al haber variado el atenuador el ruido depende de la relación entre ambas potencias.

De esta manera se puede ver que salvo el valor extremo de 0.85W que tiene menor SNR, los demás valores de potencia resultan tener una relación señal-ruido muy similares. Por tanto para las medidas definitivas se tomará un valor intermedio: 0.77W.

3.5.4. Ajuste de los parámetros del barrido (*dwell time* y paso).

Como ya se vio, estos parámetros ajustables en el láser sintonizable tienen influencia en las mediciones del sistema. Se descartaron varias configuraciones, quedando los valores modificables entre el paso de 5 pm para un *dwell time* de 0.2 s, como la medida de mayor precisión y más costosa, hasta el paso de 10 pm y *dwell time* de 0.1 s como la medida de menor precisión y más rápida, pero con precisión aceptable.

Para comprobar hasta qué punto estas variaciones tienen influencia en el ajuste final del sistema se toman varias trazas. Se utilizan los valores extremos de paso 5 y 10pm con un *dwell time* de 0.2 y 0.1 s respectivamente. También se realiza una medida intermedia con 5 pm de paso y DT de 0.1 s.

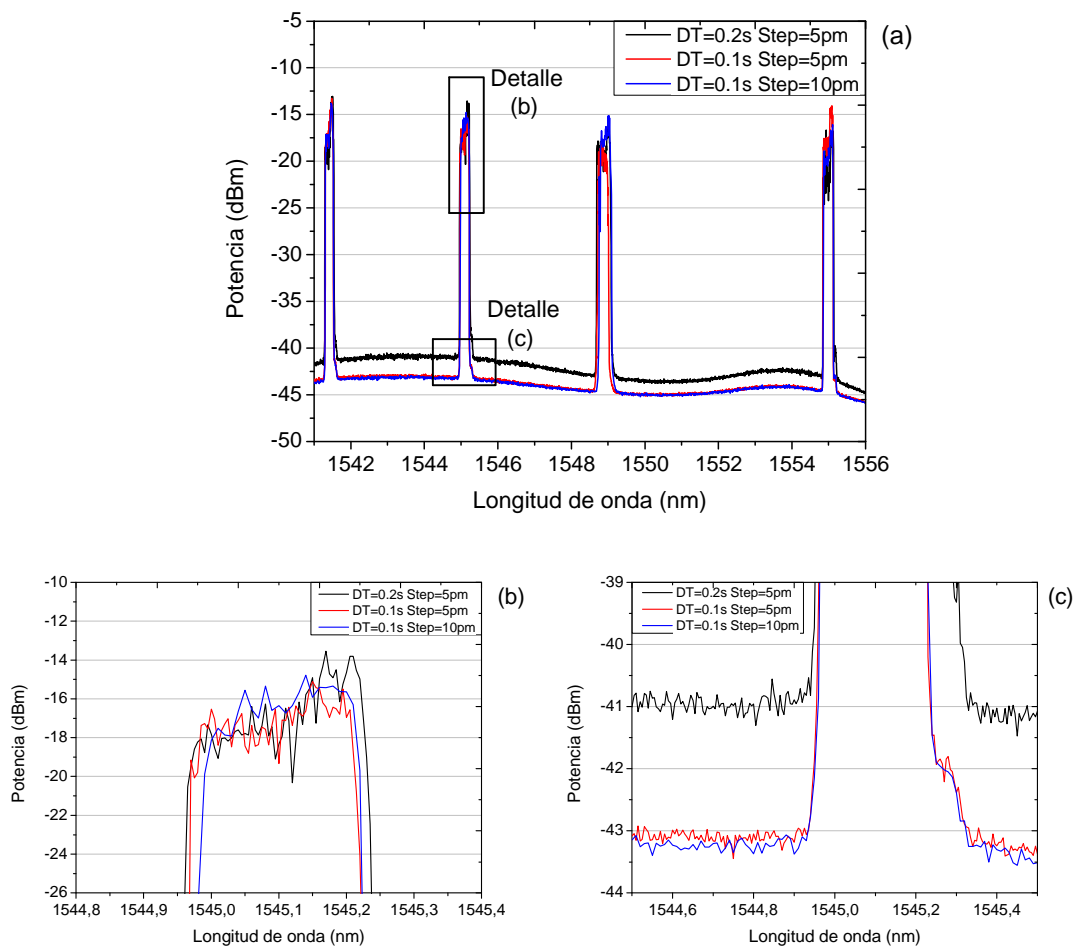


Figura 3.16. Barrido para diferentes configuraciones de barrido (a) con detalles del pico del sensor situado en 1545nm (b) y del perfil de ruido (c)

En primer lugar puede verse cómo en el sensor de 1449nm existe desplazamiento entre las diferentes trazas. Esto se debe a que se trata de un FBG sintonizable que fue manipulado entre la toma de ambas pruebas, por tanto no es un hecho relevante, pero para una mejor visión esta vez se presenta en detalle el sensor de 1545nm.

Resulta sorprendente ver que para el caso más preciso ($DT=0.2s$ y $Step=5nm$) se obtiene una potencia máxima menos estable con un pico de potencia al final del FBG. Además, este caso posee 2dB más de ruido que los otros dos casos configurados con *dwel time* de 0.1s.

Puesto que los otros dos casos poseen una respuesta más estable y con menor nivel de ruido, son estas configuraciones las utilizadas. Para el caso que se estudiará con el sistema como sensor de temperatura se utilizará un paso de 5 ó 10 pm para conseguir una resolución de 0.5° o 1°C respectivamente.

3.6. Comprobación del sistema como sensor de temperatura

En definitiva, el sistema quedó ajustado como sistema sensor remoto para una distancia de 100 km con cuatro sensores FBG multiplexados en serie. Ahora se comprueba el funcionamiento del sistema como sensor de temperatura de manera práctica.

Para ello se realizan varias pruebas de temperatura; en la primera se introduce el último de la serie de los FBG sensores (1545nm) en un horno. Se sube la temperatura 5°C a cada paso, realizando un barrido del sensor introducido cada vez. El barrido se realiza entre 1544.5 y 1546.5 nm, margen que recoge el desplazamiento del FBG entre 30 y 85 °C. De esta manera se caracteriza el sensor y se comprueba el funcionamiento del sistema de manera práctica.

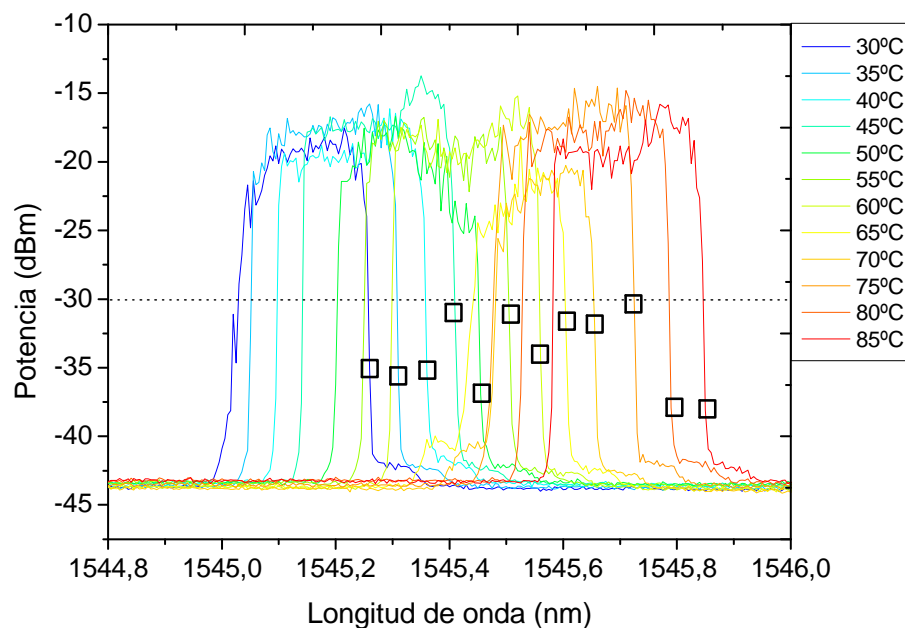
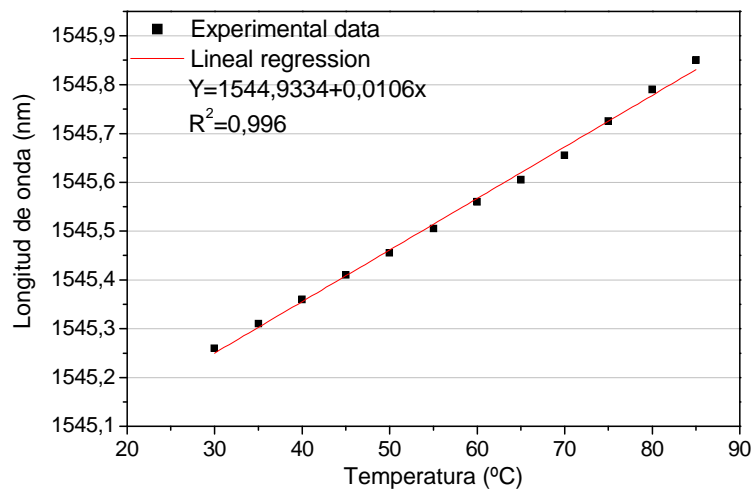


Figura 3.17. Primer barrido de temperatura

En la figura 3.17 se puede ver la superposición de las trazas recogidas desde 30 hasta 85°C. La resolución de cada traza ha sido de 5 pm (0.5 °C aprox.). Puede verse cómo el sensor ha desplazado su longitud de onda hacia valores más altos conforme aumentaba la temperatura. Para 30°C el flanco de bajada del FBG estaba situado en 1545.26 nm frente a 1545.85 nm para 85°C, es decir, se ha desplazado 590 pm en 55°C, lo que significaría una media de 10.7 pm/°C.

En cada traza hay que seleccionar un punto de referencia que indique en qué longitud de onda exactamente se encuentra el sensor. En este caso se ha escogido como punto de referencia más fiable el flanco de bajada con un umbral de -30dBm. Es decir, se toma como posición de cada FBG el primer punto del flanco de bajada que cumpla que su potencia sea menor de -30dBm. Se escoge esta referencia porque supone gran precisión ya que en el sensor se produce una caída de más de 20dBm en apenas dos muestras (10 pm). En la figura anterior puede verse la línea umbral de -30dBm así como los puntos tomados como medida de la posición del FBG para cada temperatura (recuadros negros).

Si se representan estos puntos frente a la temperatura se obtiene la relación de la longitud de onda del sensor en función de la temperatura.



Equation	y = a + b*x		
Adj. R-Square	0,99624		
		Value	Standard Error
Longitud de onda	Intercept	1544,93345	0,01174
Longitud de onda	Slope	0,01056	1,95615E-4

Figura 3.18. Gráfica de desplazamiento de la longitud de onda frente a la temperatura del primer barrido junto con la tabla de valores de la recta de ajuste.

En la gráfica anterior puede verse como el sistema tiene un comportamiento claramente lineal, con un desplazamiento de 10.6 pm/°C centrado en 1544,933 nm. El ajuste tiene un parámetro de error R^2 de 0.996 y una desviación estándar de 11.7 pm, lo que vendría a ser un error medio de 1.1 °C por muestra. Esta variación es mayor que el error esperado en el sistema de 0.5 °C dado por la resolución de 5 pm. Esto puede deberse a que el horno en el que se realizan las pruebas tiene un error de 1°C de precisión. Por lo tanto los resultados concuerdan con lo esperado.

Para comprobar la repetitividad de las medidas y además para intentar evitar el error introducido por el horno se repitió el barrido en temperatura. En esta ocasión en vez de tomar como referencia de la temperatura el indicador del propio horno, se introdujo una sonda de temperatura de precisión con la que se tomaron las lecturas.

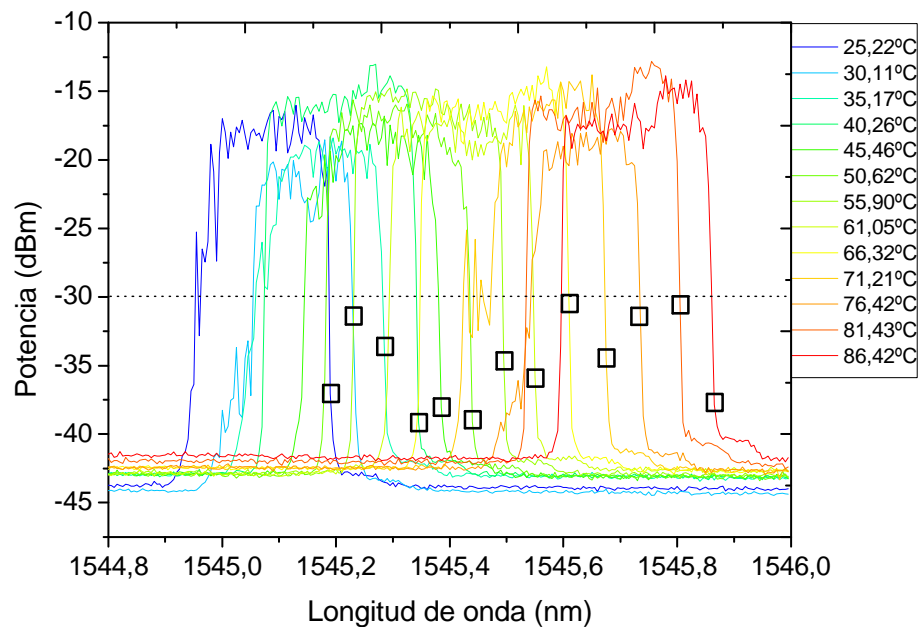


Figura 3.19. Segundo barrido de temperatura

De la misma manera que en el primer barrido, se tomaron los valores de la posición en el flanco de bajada con un umbral de -30 dBm. En esta ocasión el barrido dispone de una medida más en 25 °C, realizando el barrido de temperatura entre 25 y 85 °C. Al igual que antes, representamos los valores tomados como referencia frente a la temperatura, para comprobar su linealidad.

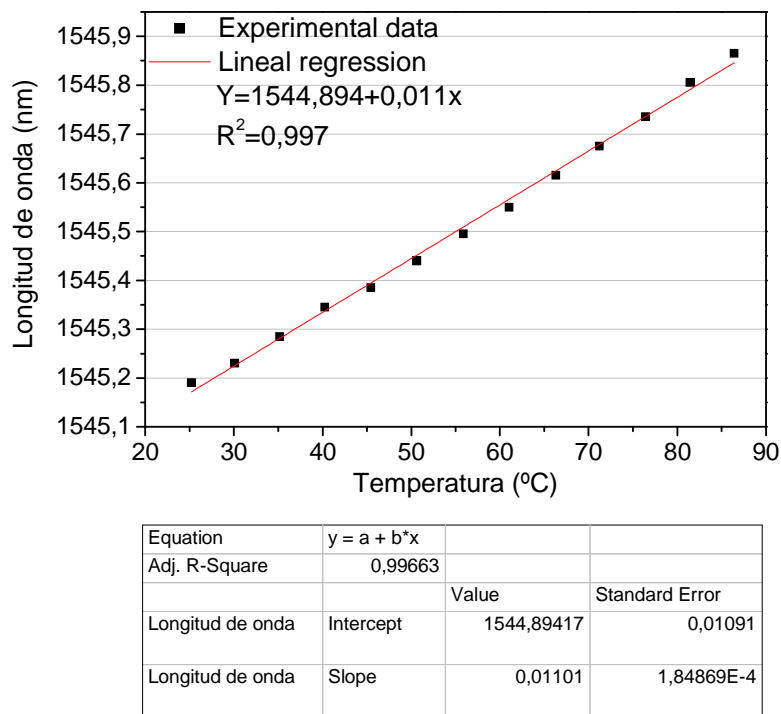


Figura 3.20. Gráfica de desplazamiento de la longitud de onda frente a la temperatura del segundo barrido junto con la tabla de valores de la recta de ajuste

De nuevo puede verse como el sistema tiene un comportamiento evidentemente lineal, con un desplazamiento de 11 pm/°C centrado en 1544,894 nm. El ajuste tiene un parámetro de error R^2 de 0.997 y una desviación estándar de 10.9 pm, lo que vendría a ser un error medio de 1 °C por muestra, apenas una décima menor que en el barrido anterior. Por tanto mediante el uso de la sonda de temperatura el error del sistema no ha mejorado.

Esto podría deberse a que la temperatura del horno no termina de estabilizarse sino que decrece una vez superado el valor asignado, se enfría hasta volver a bajar un grado centígrado, vuelve a subir de nuevo y así sucesivamente de manera oscilante. Además la medida de la sonda refleja la temperatura del aire instantáneamente, sin embargo el FBG tarda un tiempo en variar de temperatura y como ya se ha dicho, ésta oscila constantemente. Es posible que estas causas sumadas supongan un error en la toma de medidas de un grado centígrado, aunque es una hipótesis. Teóricamente la resolución del sistema la marcaría el paso del láser sintonizable, cuyos valores son 1, 5 y 10 pm. Por lo tanto las resoluciones alcanzadas para estos valores deberían variar entre 0.1, 0.5 y 1 °C.

En cualquier caso ha quedado demostrado de manera práctica la viabilidad y el buen funcionamiento del sistema para la medida de temperatura de manera remota para una distancia de 100 km.

3.7. Comparación con el método de interrogación típico por barrido.

A continuación se ven las ventajas del nuevo sistema de interrogación por barrido frente al caso de interrogación típico con bombeo Raman, ya que de no añadirle la ganancia Raman el sistema de interrogación típico por sí mismo no obtiene medida alguna.

Este método de interrogación consiste en barrer en longitud de onda con el láser sintonizable, atravesando la zona donde se encuentra el FBG. En recepción se recibirá mayor potencia cuando el láser se encuentre sobre el sensor ya que el FBG refleja la potencia en esa longitud de onda.

De esta manera se obtendrá la posición del sensor como el punto donde se reciba mayor potencia.

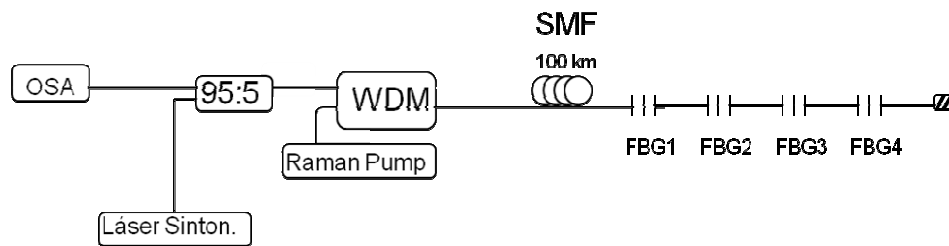


Figura 3.21. Esquema del montaje para el método de interrogación tradicional.

Para realizar las pruebas se toman dos medidas para las potencias de bombeo Raman de 0.7 y 0.8 W.

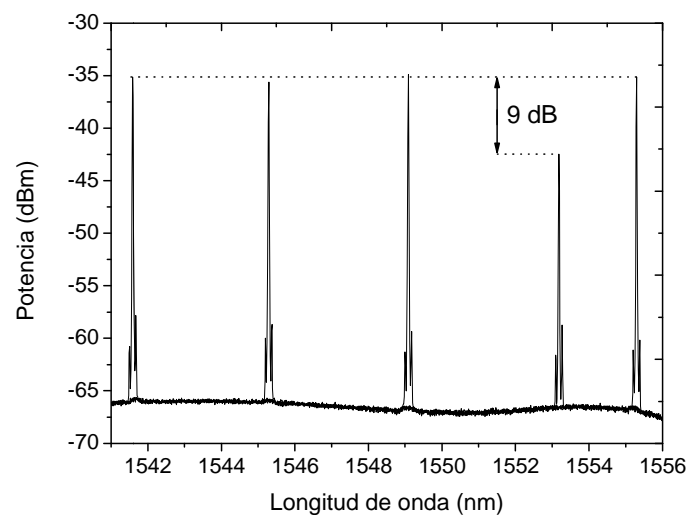


Figura 3.22. Resultado de la interrogación tradicional para un bombeo de 0.7W.

Para la primera prueba con un bombeo Raman de 0.7 W se puede ver que el sistema puede utilizarse para la interrogación, con una relación señal-ruido de aproximadamente 9 dB frente a los 28 dB del nuevo montaje.

También puede apreciarse en la gráfica cómo pese a recorrer la zona donde no se encuentran los sensores, en la cabecera se recibe señal. Esto se debe a la dispersión Rayleigh, que actúa reflejando una pequeña parte de la señal en cada punto, a modo de espejo distribuido. Por tanto toda la señal que se recibe cuando el láser sintonizable no se encuentra en los FBG (1553 nm en la figura 3.22) se debe a este efecto.

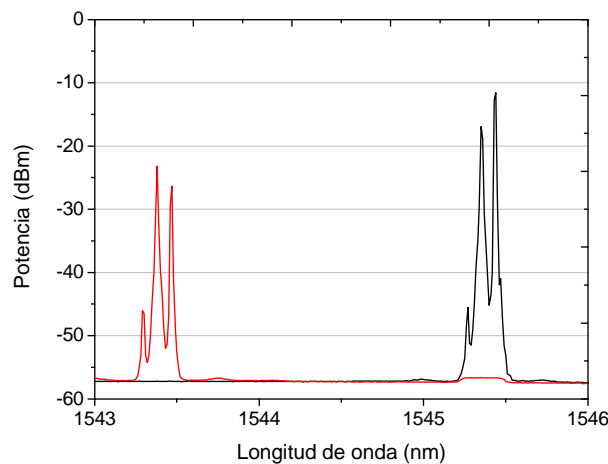


Figura 3.23. Resultado de la interrogación tradicional para un bombeo de 0.8W.

En el segundo caso, para un bombeo de 0.8 W se ve que la ganancia y por tanto la SNR es mayor, del orden de 12 dB. El problema es que cuando el láser se sintoniza con el FBG la potencia de pico de la señal la proporciona la réplica de Stokes, no el propio LS. Esto supone que la medida de temperatura está desplazada aproximadamente en 80pm, lo que supone una diferencia de medida de unos 8 °C por encima de la medida real; lo que conlleva un error inaceptable.

Por tanto se ha visto que el sistema tradicional utilizando amplificación Raman consigue una SNR de unos 9 dB, frente a los 30 dB obtenidos con el nuevo sistema de interrogación y medida. Además el coste del sistema tradicional sería mayor ya que aunque esquemáticamente parezca más simple requiere del OSA para la toma de medidas. Por el contrario el nuevo sistema no requiere OSA ni tan siquiera ESA, tan solo un receptor adecuado.

También se realizó una prueba de interrogación del sistema mediante un interrogador comercial, sin lograr resultados válidos. De esta manera se vio la incapacidad de un interrogador comercial de interrogar una red de sensores de tan larga distancia.

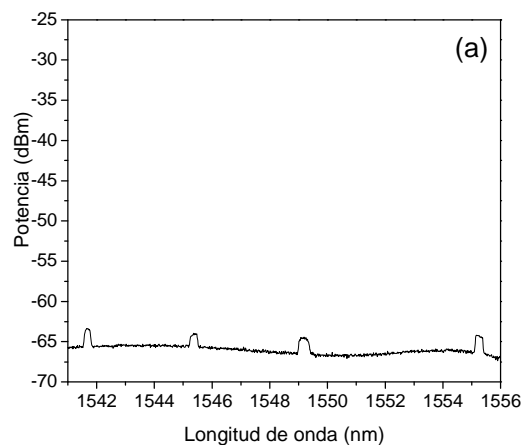
3.8. Breve resumen y conclusiones

En definitiva, el montaje final del capítulo anterior se ha utilizado como base y se ha estudiado y modificado parte a parte durante todo el capítulo siguiendo los siguientes pasos:

- Estudio de la influencia de la potencia recirculada en el anillo.
- Diseño del método de medida y simulación del receptor.
- Estudio de la capacidad de multiplexación de sensores del sistema.
- Ajuste de parámetros de medida.
- Análisis del sistema como sensor remoto de temperatura.

En cada apartado se ha ido dando forma al sistema hasta conseguir un sistema interrogación remoto para cuatro sensores a una distancia de 100 km, mediante el uso de amplificación Raman y Brillouin.

Además el sistema necesita menos amplificación Raman que la utilizada en otros estudios vistos [2]. Se necesitan menos de 0.8 W para comenzar a detectar en el OSA los cuatro sensores FBG (Fig. 3.24 (a)). Es entonces cuando se realiza un barrido con el láser sintonizable sobre la zona donde se encuentran los sensores. Cuando el LS se sitúa sobre cada sensor se generan ondas de Stokes debido a la ganancia Brillouin (Fig. 3.24.(b)) y estas ondas se encuentran separadas a unos 85 pm del bombeo Brillouin. Sin embargo, cuando el LS no coincide con ningún sensor la onda de Stokes generada es de muy poca potencia (Fig. 3.24 (c)).



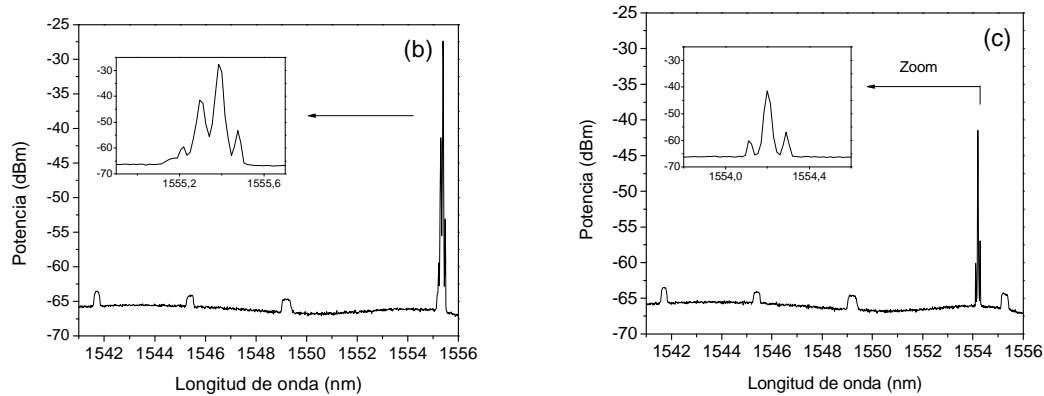


Figura 3.24. Proceso de medida, con los FBG localizados sin conectar el LS (a), con éste situado en el *grating* (b), y con el LS fuera del FBG.

Conforme el láser sintonizable barre el espectro el detector (simulado mediante el ESA y Labview) integra la potencia a cada paso a una frecuencia de 10.825 GHz. A esta frecuencia se encuentra precisamente el batido de la señal del LS y su onda de Stokes. Debido a que el heterodinaje de las dos señales aumenta de potencia al coincidir sobre el FBG se obtiene una traza que puede verse en la figura 3.25.

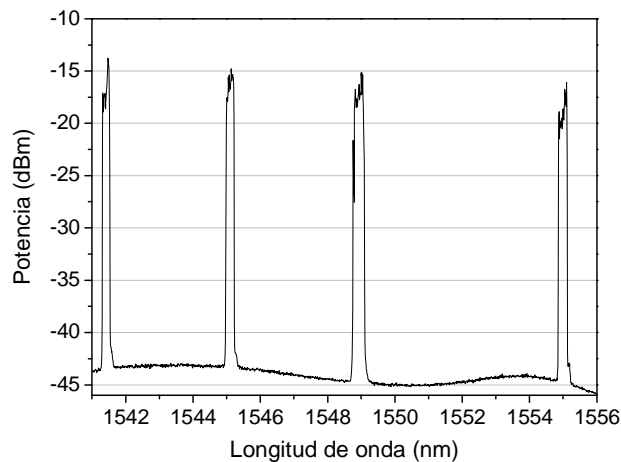


Figura 3.25. Resultado de la interrogación mediante el nuevo método

También se ha visto que el nuevo sistema tiene varias ventajas sobre los que se han visto previamente:

- La relación señal-ruido de 30 dB es mucho mayor que los 9 dB obtenidos mediante el sistema tradicional. También es mayor que los 19 dB obtenidos para 100 km en el sistema ideado por Takanori Saitoh, que a día de hoy es el más largo[19].
- La potencia de bombeo Raman utilizada (0.77 W) es mucho menor que en los sistemas para 50 km propuestos por J.h. Lee y Y. G. Han [2].

Por último se ha probado la capacidad del sistema como sensor de temperatura, comprobando el comportamiento claramente lineal del sensor con una variación de 11pm/°C (Fig. 3.26).

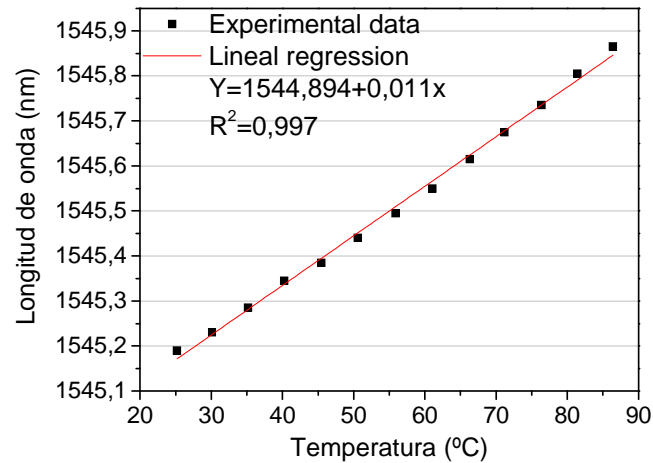


Figura 3.26. Ajuste lineal de las medidas de temperatura

En definitiva, se ha desarrollado experimentalmente una nueva técnica de interrogación remota a 100 km con multiplexación de sensores, basándose en amplificación Raman y Brillouin. La SNR obtenida de 28 dB en los cuatro sensores es la más alta conocida para 100 km de distancia de manera remota. Además, al poder prescindir del OSA y del ESA el coste de este sistema es menor que el de otros métodos.

El siguiente paso en el proceso es conseguir aplicar el sistema a mayores distancias.

CAPÍTULO IV

Resultados experimentales del sistema de monitorización remoto a 150 km.

4.1. Introducción

En este capítulo se continúa el estudio de la red de sensores remota mediante ganancia Raman y Brillouin realizado para 100 km, al que se le añaden 50 km más hasta alcanzar 150 km. Se ve qué problemas se encuentran, y se estudian posibles soluciones y modificaciones del sistema para comprobar su viabilidad.

El material utilizado para la realización de las pruebas fue el siguiente:

- Analizador de espectros óptico (OSA) AdvanTest Q8384
- Analizador de espectros eléctrico (ESA) R&S FSP30 (1093.4495.30)
- Fotodetector NewFocus 1544B
- Láser de bombeo Raman IPG RLD-3k-1445
- Amplificador de fibra dopada con Erblio (EDFA) Photonetics 3624-BT-13
- Láser sintonizable Agilent 8164B
- OTDR EXFO FTB-400
- Ordenador personal con el software Labview
- Redes de difracción Bragg centradas en 1541.4nm, 1545.1nm, 1555.1nm con una anchura de 0.23nm, 0.27nm, 0.29nm respectivamente y reflectividad del 99%.
- Red de difracción Bragg variable entre 1545-1555nm con una anchura de 0.39nm y reflectividad del 99%.
- Circuladores de tres puertos.
- Multiplexor de longitud de onda (WDM) 1445nm/1550nm
- Acopladores de 50:50, 95:5.
- 150Km de fibra monomodo estándar de Telnet
- Atenuador variable
- Controlador de polarización.
- Red de difracción Bragg de periodo largo en 1550 nm
- Filtro sintonizable Dicom tf-1550-0.8-9
- Gel adaptador de índice

El montaje sobre el que se comenzó el estudio fue similar al utilizado en el capítulo anterior con la única diferencia de que se soldaron 50 km más.

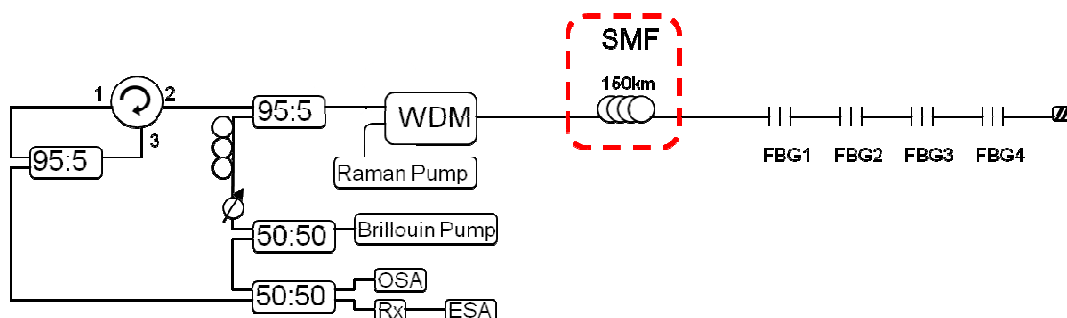


Figura 4.1. Montaje inicial para 150 km.

4.2. Influencia del aumento de potencia de bombeo Raman.

La introducción de 50 km más de fibra monomodo en el montaje tuvo una serie de repercusiones que dificultaron el funcionamiento del sistema. La primera y más simple es la falta de potencia debida a la atenuación introducida por la propia fibra monomodo con pérdidas de 0.2 dB/km.

Esto supone que en 50 km se necesitan al menos 10 dB más de ganancia para alcanzar sensor con la misma potencia que en el caso anterior. Pero además, para que la señal retorne con la misma potencia a la cabecera requiere otros 10 dB, lo que en total suponen 20 dB más de ganancia.

Esto en principio no debe suponer un problema ya que se disponía de una relación señal a ruido de 30 dB en el caso anterior, por lo que en teoría se podrían detectar los sensores con una SNR de 10 dB. Sin embargo, para las mismas condiciones usadas con 100 km no se llegan a detectar los sensores y aunque se realizase el barrido la onda de Stokes generada por Brillouin no aumentaba al sobrepasar los sensores. El problema radica en que el sistema se basaba en conseguir la emisión láser de la onda de Stokes, cosa que con esta potencia no era posible alcanzar. Si el sistema no alcanza el umbral de emisión láser aunque la potencia aumente algo sobre el *grating*, ésta no es mayor que la ganancia de la propia curva Raman en determinados puntos, no pudiendo distinguirse los sensores.

Vista la dificultad para conseguir el buen funcionamiento se optó por eliminar los sensores en serie, dejando tan sólo uno situado en 1545 nm. Una vez se consiguiese que el sistema fuera capaz de interrogarlo se volvería a estudiar la colocación del resto.

La primera solución ideada fue aumentar la potencia de bombeo Raman, para que nos generase más ganancia distribuida y permitiera conseguir la emisión láser de la onda de Stokes asociada al láser sintonizable.

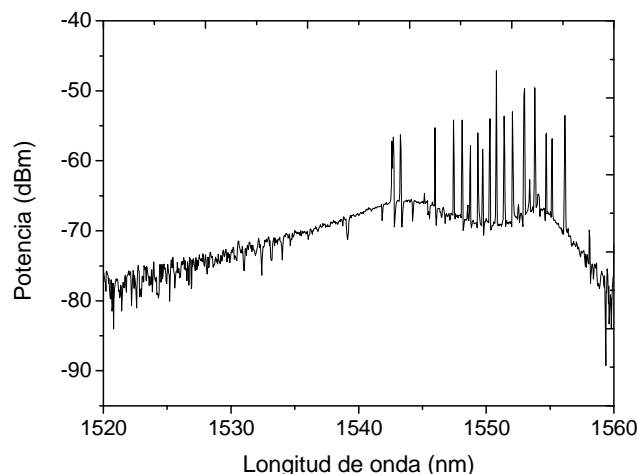


Figura 4.2. Espectro visto en OSA para un bombeo Raman de 1.1 W

Al aumentar la potencia de bombeo, antes incluso de llegar a percibir el FBG se observó en el OSA el espectro de la figura 4.2. En esta traza se observa que las zonas con mayor ganancia Raman cumplen la condición de $\text{ganancia}=\text{pérdidas}$ necesaria para la emisión láser en una cavidad. La cavidad la forman el propio espejo del sistema y el otro espejo es debido al efecto de espejo distribuido en los 150 km de fibra.

Si se sigue aumentando la potencia de bombeo Raman, se observa que este efecto desaparece para generar un pico de ganancia en torno a 1544 nm. Además ya puede percibirse el FBG, que comienza a emitir con mayor potencia que el pico comentado (Fig. 4.3 (a)). Esto puede deberse a que al aumentar el bombeo la ganancia de la zona de 1544nm aumenta tanto que comienza a emitir por sí misma. De la misma manera, debido al aumento de la ganancia en la zona del sensor, éste aparece no de forma gradual sino que instantáneamente comienza a emitir con mucha potencia, debido a la absorción de ganancia del pico de 1544 nm. Esta absorción puede verse claramente en la figura 4.3. (b) donde se compara el sistema con y sin FBG para un mismo bombeo de 1.3 W.

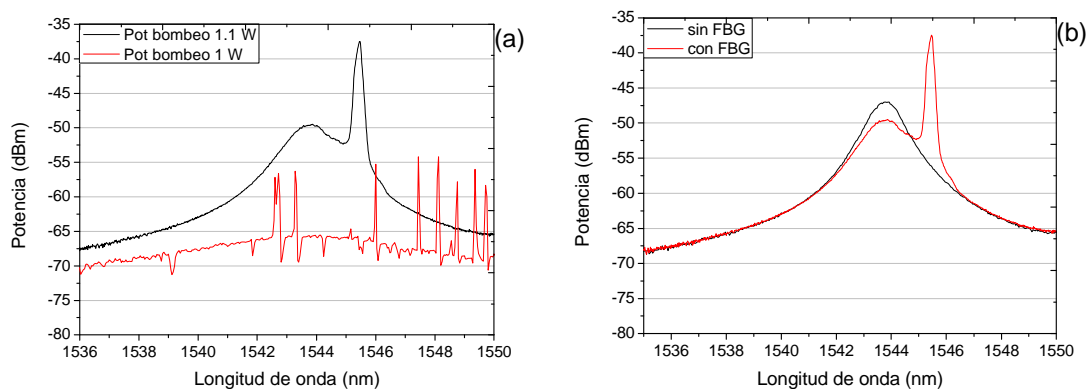


Figura 4.3. Comparativa del efecto del aumento de la potencia de bombeo Raman entre 1.1 y 1.3 W en (a) y del sistema con y sin FBG para el mismo bombeo en (b)

Se continuó aumentando la potencia de bombeo para ver el efecto en el espectro. Curiosamente el pico de ganancia de 1544 nm siguió creciendo y por lo tanto decreció la emisión láser provocada por el FBG debido a la competencia por la ganancia. Esto puede verse claramente en la figura 4.4 donde para el bombeo de 1.3 W el FBG tiene unos 7 dB más de potencia que con el bombeo de 1.4W. Por el contrario el pico de ganancia aumenta más de 12 dB al aumentar el bombeo.

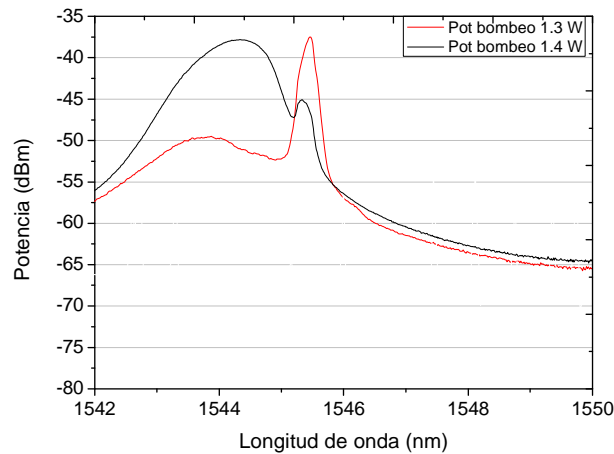


Figura 4.4. Comparativa del efecto del aumento de la potencia de bombeo Raman entre 1.3 y 1.4 W

4.3. Influencia de la presencia del láser sintonizable

Una vez vista la influencia que tiene en el sistema el aumento de la potencia de bombeo se vio la influencia que tiene la presencia o ausencia del láser sintonizable. Ya se ha visto cómo el espectro de ganancia Raman se va acentuando conforme aumenta la potencia, fomentando la aparición de emisión láser indeseada junto al efecto de espejo distribuido de la fibra. Sin embargo se ha conseguido detectar la presencia y posición del FBG, por lo que se espera poder interrogar al menos un sensor de la manera vista en el capítulo anterior.

En primer lugar se introdujo el LS en el sistema sin incluir el sensor para ver la influencia que tenía.

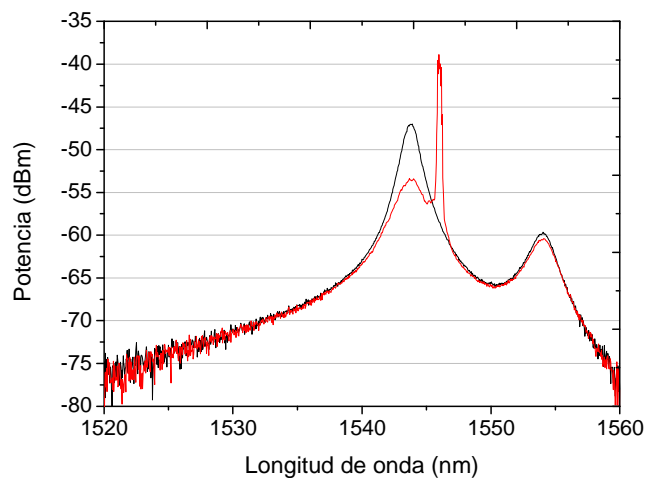


Figura 4.5. Espectro en el OSA del sistema con o sin LS.

Como puede verse el efecto es similar al visto anteriormente de colocar el FBG sin el LS. La competencia de ganancia provoca que el LS obtenga ganancia a costa del pico de 1544 nm.

A continuación se introdujo el sensor y se ajustó el bombeo Raman hasta conseguir unas condiciones similares a las logradas en el capítulo anterior. Sin embargo, se puede comprobar en la figura que aunque se coloque el LS sobre el sensor no se consigue la excitación de la onda de Stokes. De hecho no hay ninguna diferencia entre la señal dentro o fuera del FBG.

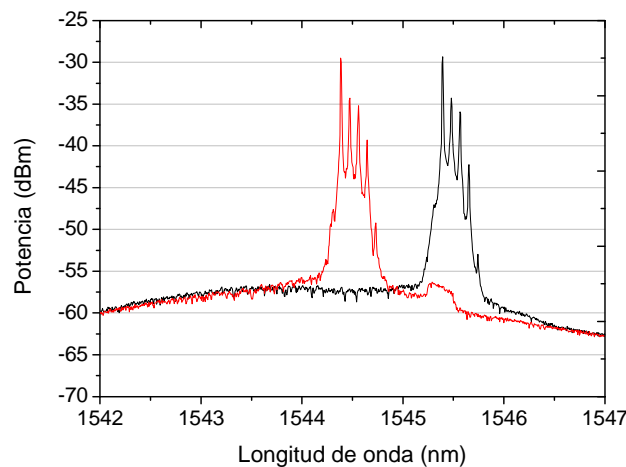


Figura 4.6. Espectro con LS situado o no en el sensor

Esto es así porque debido a la curvatura del espectro de ganancia Raman, la ganancia total que existe en 1544.5 (traza roja) es igual que la ganancia que se obtiene sobre el FBG, ya que la curva en ese punto es menor. Sin embargo, si se aumenta el bombeo Raman para conseguir mayor ganancia en el FBG, éste comienza a emitir, de manera que al superponer el láser sintonizable, el sensor no da ganancia al LS, sino que lo enmascara.

Por tanto se comprobó que no era posible interrogar el sensor en estas condiciones, así que se buscó la manera de reducir la curvatura del espectro o modificar la ganancia total del sistema.

4.4. Modificación del espectro de ganancia Raman

Como se ha visto, la deformación de la forma del espectro de ganancia Raman provoca que existan puntos de la curva donde la ganancia sea igual o mayor que sobre el *grating*. Esto provoca que la condición *ganancia=pérdidas* se cumpla para la onda de Stokes igual dentro que fuera del FBG. Por tanto se buscaron diferentes soluciones para modificar la forma de este espectro.

4.4.1. Modificación del espectro introduciendo un LPG

La primera solución ideada consistió en la introducción dentro del circulador a modo de espejo de una red Bragg de periodo largo (LPG, *Long Period grating*). Este LPG tiene el comportamiento de un FBG normal en transmisión pero en reflexión no refleja señal. Por lo tanto la idea fue introducirlo en el circulador de manera que actuase como un filtro en longitud de onda que atenuase el pico de ganancia de 1544 nm.

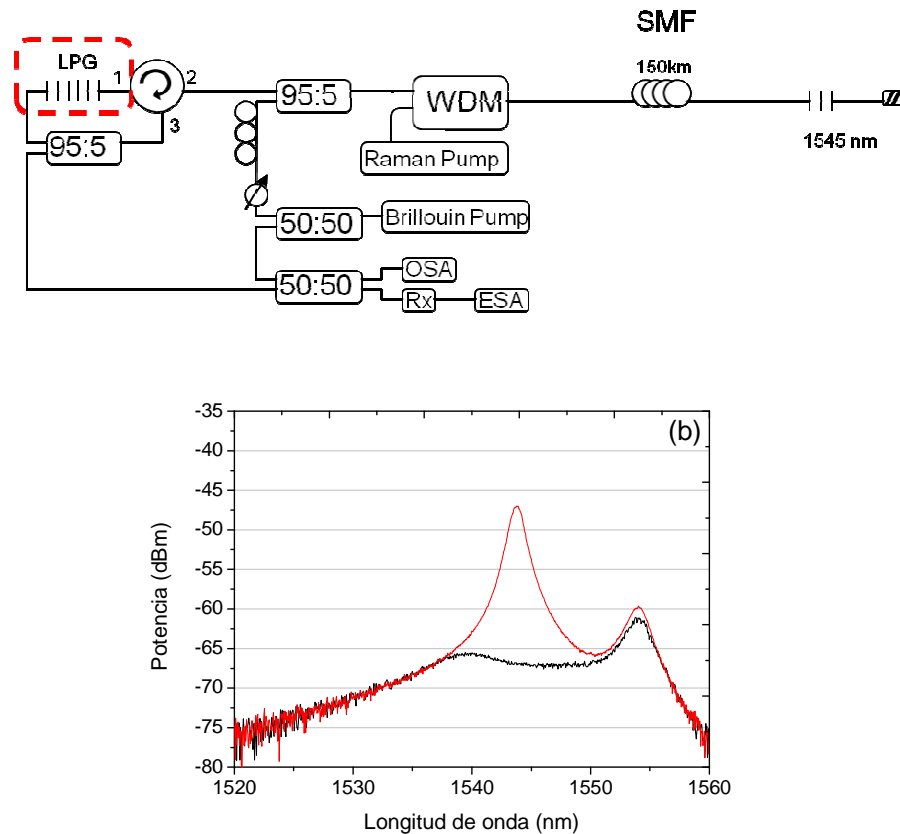


Figura 4.7. (a) Montaje con LPG. (b) Espectro del sistema con o sin LPG introducido en el espejo.

El LPG introducido se encuentra centrado en 1543.8 nm y tiene un ancho de banda de rechazo a -3 dB de 8 nm. Como se puede ver en la figura 4.7, afortunadamente el LPG se adecuaba perfectamente a lo deseado y el pico de ganancia desaparece por completo, dejando una zona de trabajo relativamente plana y en principio válida.

El problema apareció al intentar aumentar el bombeo para conseguir excitar los sensores, ya que en principio no se tenía suficiente ganancia. Si se aumentaba la potencia Raman el segundo pico situado en 1554 nm comenzaba a aumentar de potencia hasta llegar al umbral de emisión láser sin lograr que la ganancia en la zona plana creciera, de manera que era imposible localizar los sensores.

Para tratar de evitar este nuevo problema se trató de introducir otro LPG centrado en 1555 nm, pero éste se encontraba en mal estado, no dando el resultado esperado. Por tanto éste método quedó descartado.

4.4.2. Modificación del espectro introduciendo un FBG sintonizable

Al igual que en el caso anterior, la idea era introducir en el circulador un FBG sintonizable de manera que se pudiera modificar selectivamente el espectro de ganancia.

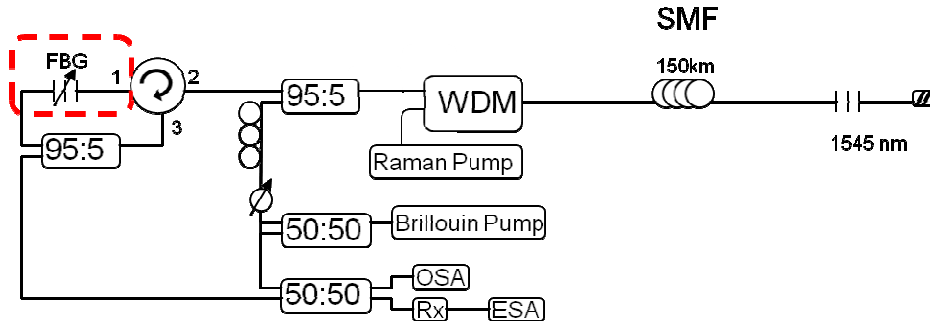


Figura 4.8. Montaje con un FBG sintonizable en el espejo.

La idea era similar a la prueba anterior con el LPG, sólo que esta vez se podía modificar manualmente el espectro. Sin embargo el resultado no resultó de interés ya que la respuesta del FBG es demasiado estrecha y selectiva. Así, la modificación de una parte del espectro de esta manera tan selectiva apenas le afecta al resto.

De la misma manera se probó a introducir un filtro sintonizable en longitud de onda, pero el resultado fue similar. También se probaron de manera simultánea con el LPG para intentar minimizar la ganancia del nuevo pico en 1554 nm, pero al tener una respuesta tan estrecha apenas permitía aumentar la ganancia de la parte aplanada del espectro.

Por tanto hubo que buscar nuevas alternativas para poder aumentar la ganancia en el sistema sin tener que aumentar más el bombeo Raman.

4.5. Aumento de la ganancia sin aumentar el bombeo Raman

Para aumentar la ganancia del sistema sin aumentar el bombeo Raman tanto que el espectro se acentúe demasiado se plantearon diferentes ideas: Revisar las conexiones y soldaduras del sistema, modificar el espejo para un reflejo selectivo, introducir amplificación con Erblio o reintroducir el bombeo Raman residual tras el FBG sensor.

4.5.1. Aumento de la ganancia mediante el ajuste del sistema

Al igual que en el capítulo anterior, con el fin de mejorar las prestaciones del sistema y tratar de reducir el bombeo necesario en el sistema, se revisaron todas las conexiones del sistema y se limpiaron. El propio uso del sistema, reconexión constante en las pruebas y el uso de altas potencias, hace que determinadas conexiones puedan degradarse o ensuciarse.

Por tanto se analizó de nuevo el sistema mediante el OTDR y se realizaron varias soldaduras tras localizarse reflexiones.

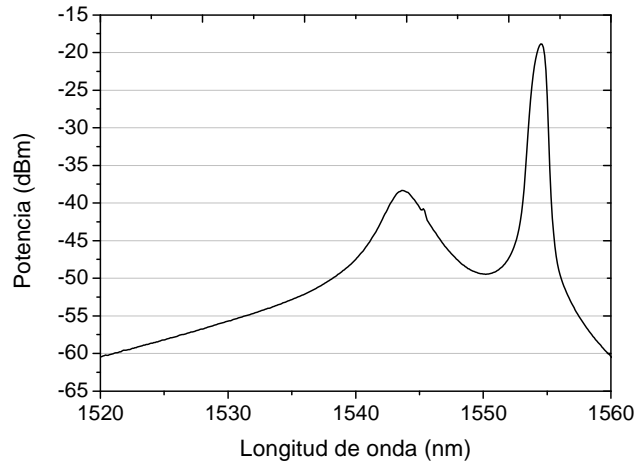


Figura 4.9. Espectro del sistema tras realizar las nuevas soldaduras

Se volvió a analizar la respuesta del sistema y se observó que el bombeo necesario para que el sistema produjese emisión láser debido al espejo distribuido era mucho menor. De la misma manera se requería menor bombeo para hacer emitir el pico de ganancia Raman. Lo sorprendente es que el pico de ganancia Raman esta vez se encontraba en 1554 nm en vez de en 1544 nm como en el caso anterior.

Lo que antes era el segundo pico de ganancia que solo crecía al atenuar el de 1544 nm con el LPG ahora era el principal pico, eso sí, con menor bombeo que el que era necesario antes.

Lo esperado teóricamente es que el pico de ganancia Raman se encuentre 100 nm desplazado respecto al bombeo. Puesto que el bombeo se encuentra en 1445 nm lo esperado y obtenido en el caso anterior es que estuviera en 1545 nm, no en 1555 nm como es el caso actual.

Por tanto tras revisar las conexiones y soldaduras y comprobar su buen funcionamiento se comprobó el espectro del bombeo Raman (normalizado a 4 dBm de pico).

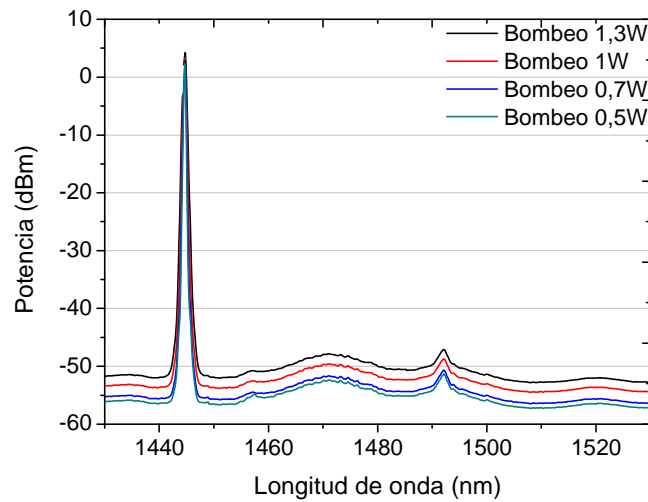


Figura 4.10. Espectro del bombeo Raman normalizado a 4 dBm de pico.

Como puede verse, el bombeo se encuentra correctamente situado, por lo que esta no era la causa de la aparente desviación. Probablemente este cambio se debió simplemente al haber eliminado pérdidas o reflexiones que afectasen más a la longitud de onda 1555 nm.

En cualquier caso se consiguió que el sistema requiriera menos potencia de bombeo que en los casos iniciales, mediante la limpieza y realización de nuevas soldaduras.

4.5.2. Modificación del espejo para respuesta selectiva

Para eliminar el efecto de emisión láser parásita debido al efecto de espejo distribuido visto anteriormente (Fig. 4.11) se planteó la opción de sustituir el espejo formado por el circulador por un espejo selectivo en frecuencia.

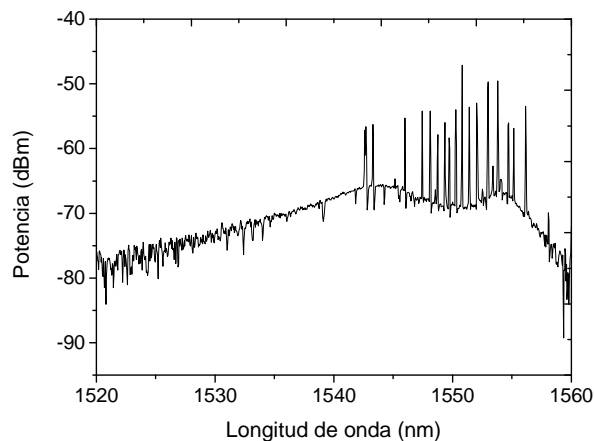


Figura 4.11. Espectro de la emisión láser indeseada.

Puesto que esta emisión láser se producía debido a la cavidad formada por el espejo distribuido y el espejo formado por el circulador, se quiso eliminar con el espejo selectivo. De esta manera las longitudes de onda no reflejadas por el nuevo espejo no dispondrían de la suficiente ganancia recirculando para llegar a emitir.

Para implementar el sistema con espejo selectivo se utilizó el FBG sintonizable colocado en la posición del circulador. De esta manera el FBG sintonizable reflejaba sólo sus longitudes de onda, transmitiendo el resto hacia un conector con adaptador de índice.

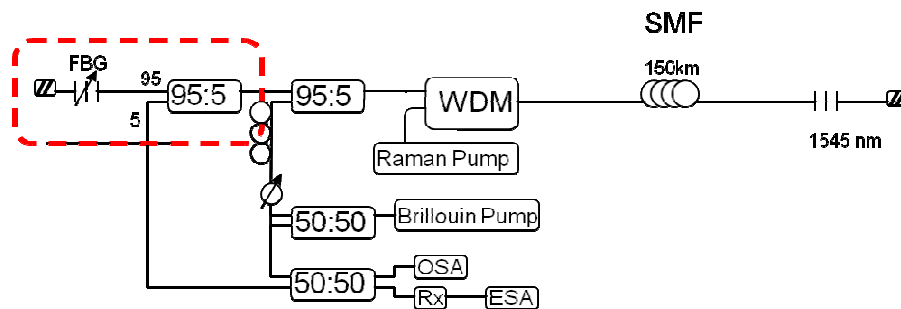


Figura 4.12. Montaje sustituyendo el espejo por un FBG sintonizable

El resultado parecía aceptable en el OSA, al no producirse la emisión láser parásita al aumentar el bombeo Raman. Además podía distinguirse claramente en el OSA la señal con su onda de Stokes generada y el sensor FBG, permitiendo aparentemente medirla en el ESA. El único problema parecía ser la gran variación en potencia de la ganancia en la onda de Stokes. Por tanto se realizó el barrido del sensor en el ESA medido mediante Labview.

En un caso se colocó el FBG sintonizable fuera del sensor, y en el otro se situó encima. El resultado fue en ambas situaciones el mismo, no viéndose ninguna diferencia apreciable sobre el sensor. Además, las grandes variaciones en la onda de Stokes quedaron reflejadas en la medida.

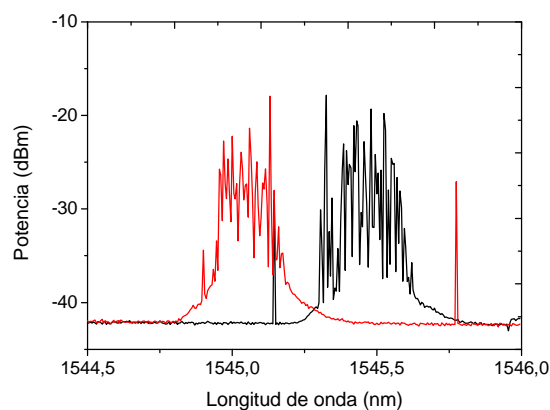


Figura 4.13. Barrido del sensor para el sistema con espejo selectivo.

Se realizó un estudio para diferentes valores de amplificación del EDFA llegándose a la conclusión de que la única condición para la que el sistema mejoraba era para un valor de corriente del láser de bombeo del EDFA de unos 17 mA. En este caso fue posible medir mediante el barrido en el ESA el sensor FBG.

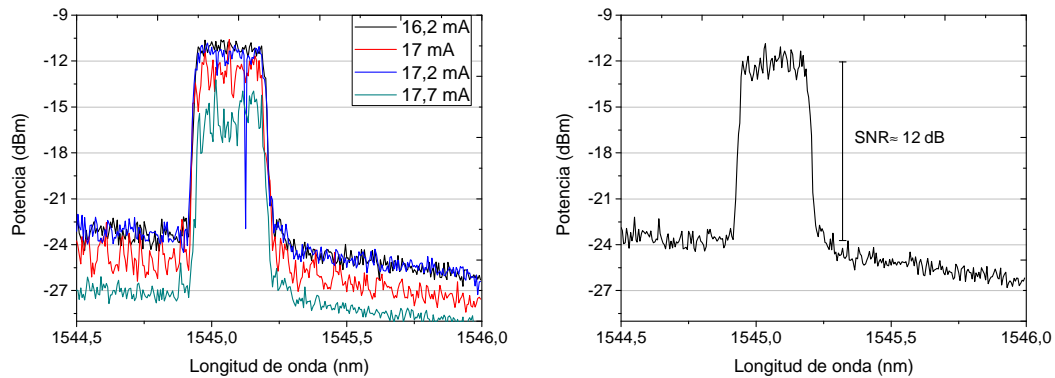


Figura 4.16. Barrido en el ESA del sensor FBG colocado en 1545 nm.

Para mayores valores de amplificación se obtenía la emisión láser indeseada de casos anteriores incluso con menor bombeo Raman que antes. Cuanta más amplificación se añadía en el EDFA antes se producía la emisión láser.

Sin embargo, para un bombeo de 1.25 W y el EDFA ecualizado a 17 mA se consiguió una SNR en la medida de unos 12 dB. Sin embargo, pese a que en el montaje sin EDFA se producía la emisión láser parásita entre 1 y 1.2 W, ya no aparecía. Esto podría deberse a que el EDFA actúa como un aislador al dejar circular la señal sólo en un sentido. Esto evitaría que pudiera aparecer un fenómeno conocido como *spacial hole burning* que podría afectar a la respuesta del sistema.

Esto podría explicar por qué el sistema mejora para valores tan pequeños de ganancia en el EDFA. Para comprobarlo se sustituyó el EDFA en el montaje por un aislador, sin embargo los resultados fueron iguales al montaje sin el EDFA, por lo que se descartó esta hipótesis.

Otra posibilidad es que el EDFA estuviera actuando a modo de absorbente saturable, modificando la forma del espectro de ganancia Raman. Para observar la influencia del EDFA en el espectro se realizaron varias pruebas. En todas ellas las medidas se realizaron en la posición del FBG sensor tras los 150 km de fibra monomodo.

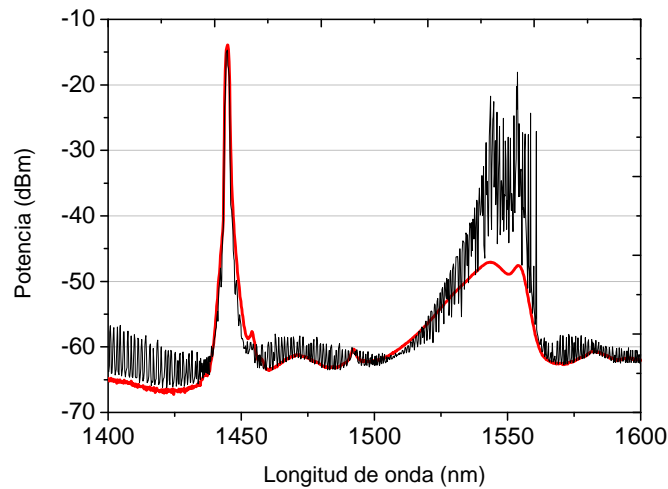


Figura 4.17. Espectro de ganancia con o sin el EDFA en el circulador

En la primera prueba se analizó el sistema con el EDFA dentro del circulador, pero con éste apagado. Se comprobó para un bombeo de 1.2 W la correcta forma del espectro de ganancia y la no aparición de emisión láser indeseada (línea roja en la Fig. 4.17). Sin embargo si no se incluye el EDFA en el montaje, al alcanzar 1.08 W se produce la emisión indeseada (línea negra).

Como detalle se puede observar que el bombeo Raman que alcanza el sensor tiene una potencia de -14 dBm. Por lo tanto queda comprobado lo visto en el apartado anterior, aunque se reintroduzca el bombeo en el sistema, éste no tiene potencia para generar ganancia.

A continuación se repitieron las pruebas anteriores, con el sistema con o sin el EDFA (apagado) para un bombeo de 1.45 W.

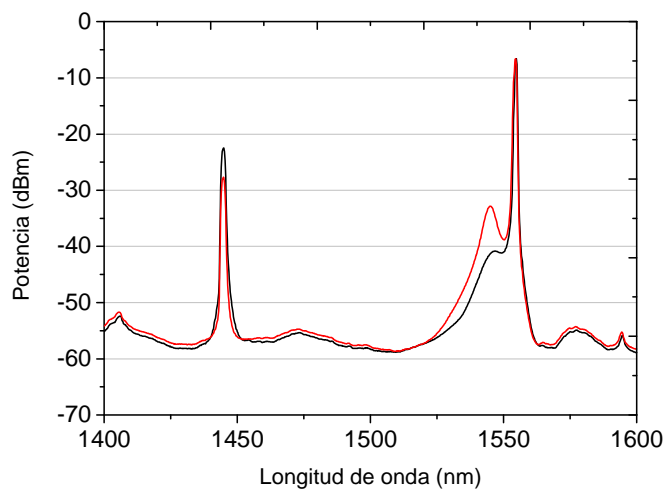


Figura 4.18. Espectro de ganancia con o sin el EDFA en el circulador (bombeo 1.45 W)

En esta ocasión se observó como el pico de ganancia de 1554 nm ya había comenzado la emisión láser en ambas situaciones. Sin embargo la forma del espectro en los dos casos es diferente en la zona de interés.

Está demostrado que la forma del espectro cambia para los dos casos, con lo cual la presencia del EDFA tiene influencia en la forma del espectro, además de evitar la emisión láser indeseada.

Por tanto, al igual que en el montaje para 100 km, el siguiente paso fué incluir más sensores en serie. En primer lugar se introdujeron los cuatro FBG utilizados en el montaje anterior.

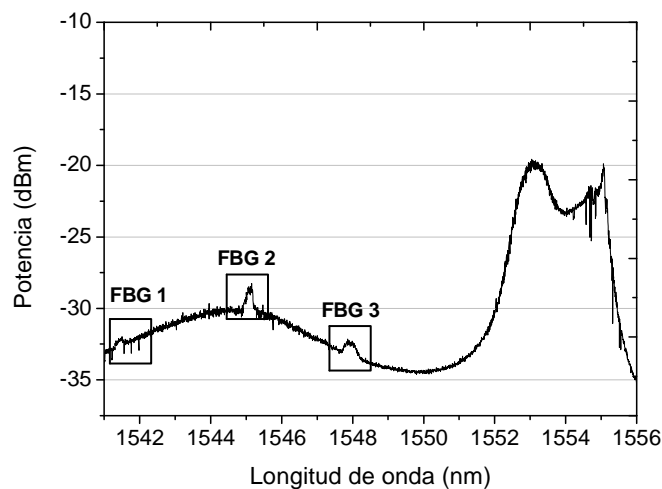


Figura 4.19. Medida de los 4 sensores para bombeo de 1.25 W

Tras realizar todos los ajustes posibles en el sistema, tanto de potencia de bombeo, ganancia del EDFA y potencia del láser sintonizable, la mejor situación conseguida fue la vista en la figura 4.19. Para un bombeo de 1.25 W y 17 mA medidos en el EDFA es posible reconocer los tres primeros FBG, pero el último es irreconocible.

Esto se debe a que si se ecualiza el sistema para que el FBG 2 sea reconocible como en los casos anteriores (necesita algo más de potencia que antes), el pico de ganancia de 1554 nm comienza a emitir por sí mismo, absorbiendo parte de la ganancia de 1544 nm. Sin embargo, si se ecualiza el sistema para que el FBG 4 sea reconocible, los demás *grating* dejan de observarse. De esta manera fue imposible ajustar el sistema para la localización de los cuatro sensores debido a la variación tan acentuada del espectro de ganancia Raman.

Por tanto se optó por introducir tan sólo dos sensores en serie. Estos estaban situados en 1545 y 1548 nm.

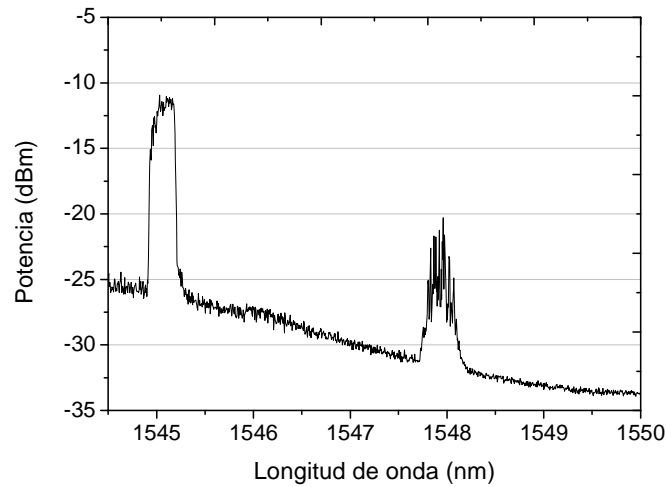


Figura 4.20. Medida de dos sensores en serie para un bombeo de 1.27 W

El mejor caso obtenido para esta configuración fue con un bombeo Raman de 1.27 W y con el EDFA con una corriente de 17.2 mA. En este caso se consiguió distinguir perfectamente el sensor de 1545 nm, sin embargo el segundo no tenía la suficiente potencia para obtener una SNR aceptable. De nuevo si se ajustaba el sistema para optimizar el segundo sensor, la componente Stokes comenzaba a emitir por sí misma para 1546 nm (fuera del sensor), desvirtuando la medida del primero. Sin embargo también se vio que si se ecualizaba en base al primero, era el segundo el que aparecía desvirtuado.

Por tanto se ve que en estas condiciones no es posible utilizar el sistema para la multiplexación de varios sensores, aunque por otra parte se ha visto que el sistema es capaz de interrogar un sensor con una SNR de más de 12 dB.

4.6. Breve resumen y conclusiones

Durante el capítulo se ha estudiado la viabilidad de aumentar la distancia de interrogación para la red de sensores remota mediante amplificación Brillouin y Raman. Sin embargo el paso de 100 a 150 km supone más que la necesidad de potencia debido a la atenuación introducida.

Se han estudiado las nuevas condiciones del sistema, y la influencia de efectos como el aumento del bombeo Raman o la presencia del láser sintonizable. Esto ha supuesto la aparición de nuevos problemas a los que se han buscado nuevas soluciones.

Un nuevo problema encontrado es la aparición de emisión láser indeseada que desaparece con la introducción en el sistema de un amplificador de fibra dopada con Erblio.

Sin embargo el mayor problema es la deformación del espectro de ganancia para la gran potencia de bombeo requerida. Hasta el punto de que los picos de ganancia llegan a emitir por sí mismos. Para este problema se han buscado diferentes soluciones, pero ninguna de ellas con éxito.

En el mejor de los casos se consigue interrogar un solo sensor con una relación señal ruido de unos 12 dB.

Para continuar con el desarrollo del sistema se considera una longitud de interrogación intermedia de 125 km. En este caso se espera que sea posible conseguir interrogar los cuatro sensores con una buena SNR, introduciendo modificaciones para preparar de nuevo el paso a 150 km con nuevas soluciones.

CAPÍTULO V

Resultados experimentales del sistema de monitorización remoto con amplificación de fibra dopada con Erblio.

5.1. Introducción

En este capítulo se estudia la red de sensores remota mediante ganancia Raman y Brillouin añadiendo amplificación mediante fibra dopada con Erblio. Se trata de buscar soluciones a los problemas vistos en el caso de 150km, además de estudiar la influencia de la amplificación de fibra dopada con Erblio para aumentar de nuevo la distancia de interrogación.

El material utilizado para la realización de las pruebas de este capítulo fue el siguiente:

- Analizador de espectros óptico (OSA) AdvanTest Q8384
- Analizador de espectros eléctrico (ESA) R&S FSP30 (1093.4495.30)
- Fotodetector NewFocus 1544B
- Láser de bombeo Raman IPG RLD-3k-1445
- Amplificador de fibra dopada con Erblio (EDFA) Photonetics 3624-BT-13
- Láser sintonizable Agilent 8164B
- Secciones de 1y 3 m de fibra dopada con Erblio 80 de Liekki.
- Secciones de 5 y 7m de fibra dopada con Erblio 30 de Liekki.
- “*Polarization scrambler*” (Newport 2580P)
- Filtro autosintonizable MICRON OPTICS FFP-C
- Fuente de alimentación Agilent E3647A
- Controlador de voltaje
- Filtro paso banda sintonizable Dicom tf-1550-0.8-9
- Ordenador personal con el software Labview
- Redes de difracción Bragg centradas en 1541.4nm, 1545.1nm, 1555.1nm con una anchura de 0.23nm, 0.27nm, 0.29nm respectivamente y reflectividad del 99%.
- Red de difracción Bragg variable entre 1545-1555nm con una anchura de 0.39nm y reflectividad del 99%. (AOS)
- Circuladores de tres puertos LZX.
- Multiplexor de longitud de onda (WDM) 1445nm/1550nm
- Acopladores de 50:50, 95:5.
- 155Km de fibra monomodo estándar TELNET
- Atenuador variable
- Controlador de polarización.
- Gel adaptador de índice

El montaje sobre el que se comenzó el estudio es el utilizado en el capítulo anterior con la única diferencia de que se eliminó un carrete de 50 km y se soldó en su lugar otro de 25 km.

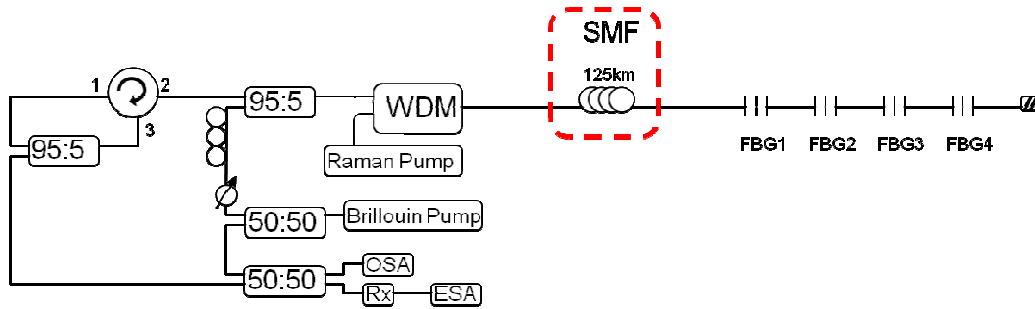


Figura 5.1. Esquema inicial del montaje para 125 km

5.2. Análisis del montaje

En primer lugar se analizó el sistema para 125 km, observando el espectro y viéndose que es posible medir los cuatro sensores colocados en serie. Para comprobarlo se realizaron diferentes medidas con una potencia de bombeo Raman en torno a 0.85 W.

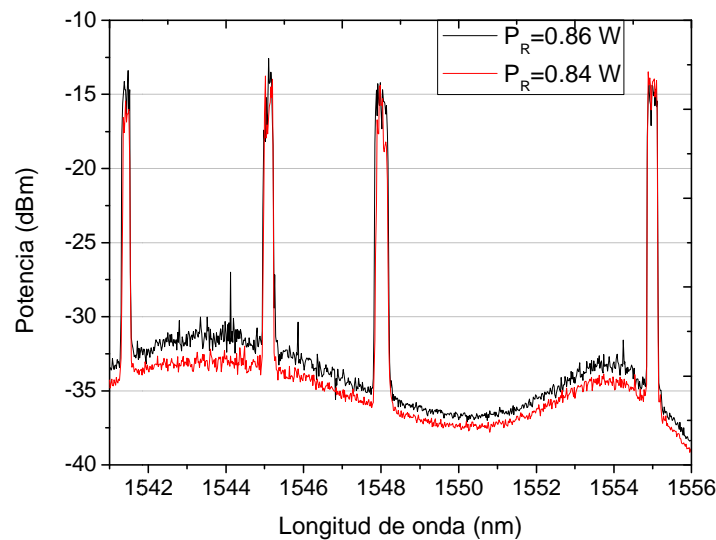


Figura 5.2. Resultado de las medidas para 125 km

Se observó que era posible interrogar a los cuatro sensores con una relación señal-ruido aceptable de entre 17 y 20 dB. Sin embargo se observó que el espectro de ganancia estaba muy deformado, tanto que el FBG sintonizable se tuvo que situar en 1548 nm ya que estando en la posición anterior (1549 nm) no tenía ganancia suficiente para excitarse. Si se equalizaba el sistema para que en 1549 nm fuese posible medir, los picos de ganancia de 1554 y 1544 nm comenzaban a excitarse desvirtuando la medida.

En cualquier caso, fue posible realizar la medida de cuatro sensores en serie correctamente colocados para 125 km.

5.3. Influencia en el sistema de un amplificador de fibra dopada con Erblio (EDFA)

Pese a haber conseguido realizar medidas correctamente se continuó con el estudio de la influencia en el sistema de amplificación mediante fibra dopada con Erblio. De esta manera se intentaron implementar nuevas mejoras en el sistema que permitieran aumentar la distancia de monitorización.

Para ello se estudió la influencia de añadir en el anillo un amplificador de fibra dopada con Erblio (EDFA) al igual que en el capítulo anterior.

5.3.1. Análisis de la atenuación del EDFA

En el capítulo anterior se vio la influencia de la presencia en el espejo del EDFA, incluso estando éste apagado. Se planteó la posibilidad de que el cambio en la respuesta del sistema con su presencia se debiera a estar actuando como un absorbente saturable. Otra opción era simplemente que el EDFA estuviera atenuando la señal recirculada. De esta manera en un caso extremo se podría ver como un corte en la recirculación, eso explicaría el porqué la presencia del EDFA en el espejo inhibe la emisión láser indeseada, ya que se está eliminando uno de los espejos de la cavidad necesarios para la emisión. Y aun no viéndose como un corte, sino simplemente como una atenuación, son más pérdidas en la condición $\text{ganancia} = \text{pérdidas}$ necesaria para la emisión láser en una cavidad.

Para comprobar cómo actuaba el EDFA al estar desconectado se midieron las pérdidas que introducía para diferentes longitudes de onda. Las medidas de referencia se realizaron conectando directamente el láser sintonizable al OSA. Luego se introdujo el EDFA apagado tras el LS y antes del OSA obteniéndose:

Longitud de onda (nm)	Atenuación (dB)
1540	26.75
1545	22.75
1548	19.08
1555	17.46

Tabla 5.1. Atenuación del EDFA

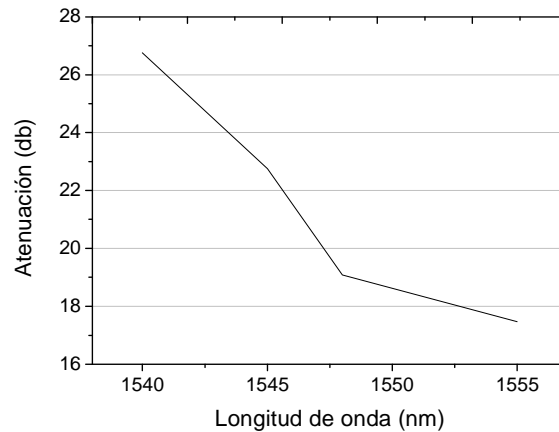


Figura 5.3. Atenuación del EDFA en función de la longitud de onda

Se tomaron unos pocos valores en la zona de trabajo ya que el objetivo no era la caracterización sino simplemente estudiar la tendencia. Como se pudo comprobar la atenuación que introduce el EDFA apagado no es constante en longitud de onda sino que varía mucho, unos 9 dB en 15 nm. Además los valores de atenuación son muy altos, de entre 17 y 27 dB en la zona de trabajo.

Por tanto el efecto que produce el EDFA en el espejo es el de un atenuador que varía de valor en función de la longitud de onda. Como se ha dicho antes ésta probablemente sea la razón por la cual introducir el EDFA supone la desaparición de la emisión láser indeseada.

En cualquier caso, su presencia en el espejo apagado o con un mínimo de amplificación permite modificar la respuesta del sistema al cambiar la forma del espectro de ganancia, lo cual en circunstancias específicas puede mejorar los resultados.

5.3.2. Análisis del sistema para 125 km y EDFA en el espejo

En primer lugar se estudió la respuesta del sistema al introducir en el espejo el EDFA, inicialmente sin ganancia, pero que se aumentó para ver su influencia.

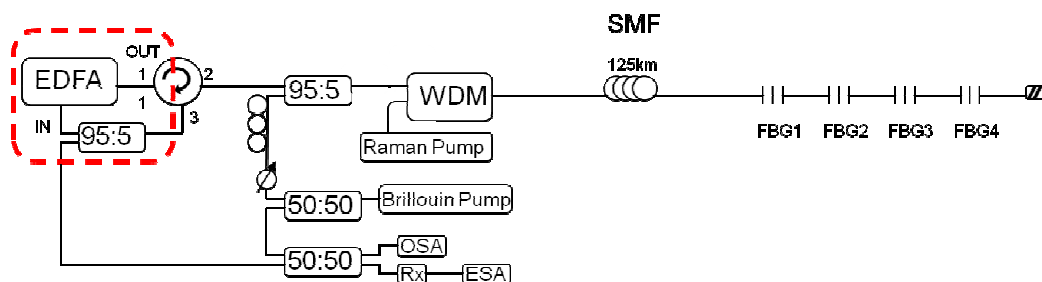


Figura 5.4. Montaje de 125 km con EDFA en el espejo

Se tomaron las medidas para la potencia de bombeo Raman utilizada en las medidas anteriores de 0.86 W. Primero se compararon las medidas del espectro visto en el espejo.

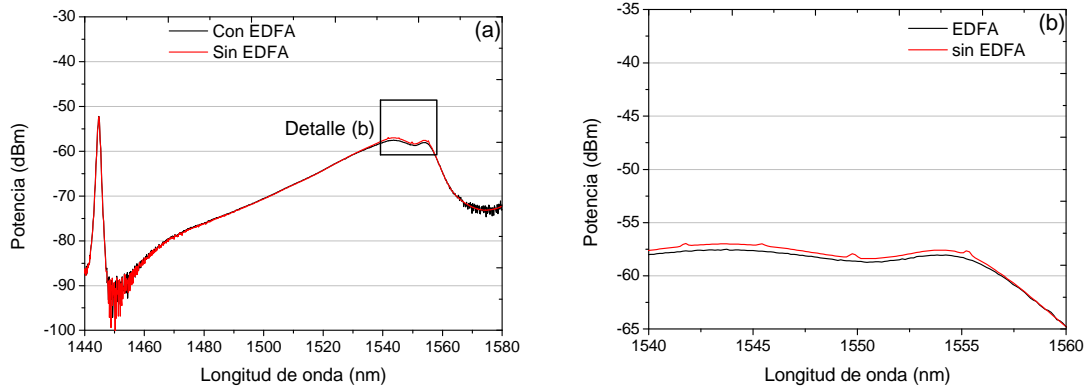


Figura 5.5. Medidas para 125 km con y sin EDFA de todo el espectro (a) o en detalle de la zona de trabajo (b)

Se pudo ver que los espectros eran aparentemente muy parecidos. Sin embargo en el espectro sin EDFA (apagado) la ganancia en la zona de trabajo era algo mayor. No había mucha diferencia pero sí la suficiente para que se pudieran visualizar los sensores, mientras que en el espectro con EDFA no. Esta diferencia de ganancia probablemente se debió a la atenuación que introduce dentro del anillo, dejando recircular menos potencia.

El siguiente paso fue aumentar la ganancia del EDFA para el mismo bombeo Raman y ver su influencia.

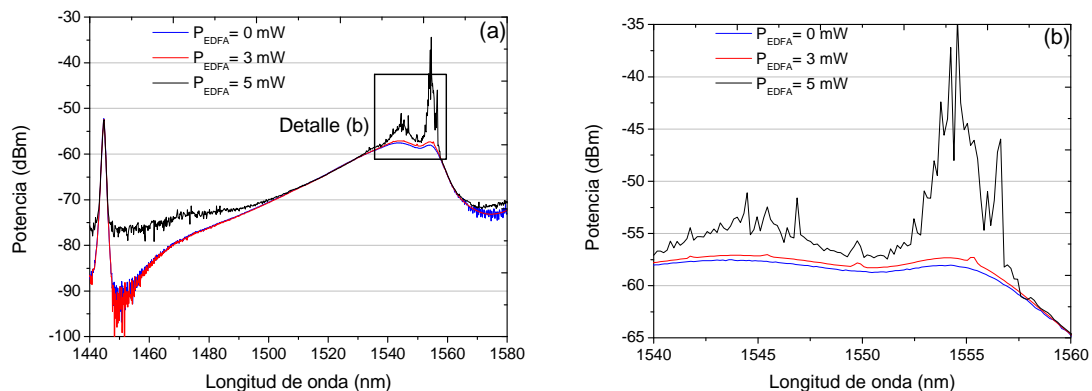


Figura 5.6. Medidas para 125 km con EDFA a diferentes potencias de todo el espectro (a) o en detalle de la zona de trabajo (b)

Esta vez se pudo ver cómo al aumentar la potencia de bombeo del EDFA (siempre para valores muy pequeños) aumentaba la ganancia en la zona de trabajo, aunque en el resto del espectro era sensiblemente igual. También pudo verse que en cuanto la potencia del EDFA aumentaba el sistema comenzaba a generar emisión láser espontáneamente.

En cualquier caso es evidente que para potencias bajas la presencia del EDFA aunque ligeramente, mejora el funcionamiento del sistema frente a estar desconectado. Comparamos ahora los dos mejores casos: La presencia del EDFA (3 mW) frente a la ausencia de éste en el espejo.

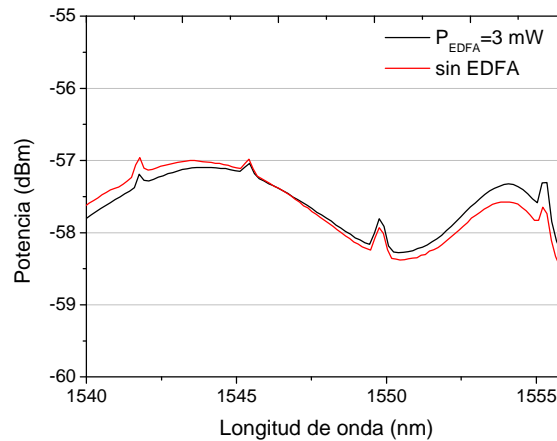


Figura 5.7. Detalle de la zona de trabajo para el caso sin EDFA y con EDFA a 3 mW

Se puede ver cómo aunque el perfil es muy parecido, la presencia del EDFA a 3 mW aumenta la ganancia en la zona de 1554 nm y la disminuye en 1543 nm. Son valores pequeños de décimas de decibelio, pero es suficiente para comprobar lo visto en el apartado segundo donde se ha visto que la atenuación del EDFA es mayor para longitudes de onda bajas.

Por tanto se ha comprobado que la presencia del EDFA con un bombeo ajustado aumenta la ganancia en la zona de trabajo y que de la misma manera modifica el espectro de ganancia. Sin embargo estos ajustes son muy sensibles y particulares para cada caso, con unos márgenes de mejora muy pequeños.

5.4. Análisis del sistema incluyendo secciones de fibra dopada con Erblio

Es sabido que la fibra fuertemente dopada con Erblio genera ganancia si se bombea con el bombeo Raman a una longitud de onda de 1445 nm[22]. Por tanto, lo que se pretende en este apartado es estudiar la influencia en el sistema de incluir secciones de fibra dopada con Erblio intercaladas en diferentes partes del sistema. De esta manera, el bombeo Raman genera ganancia distribuida durante el tramo de fibra monomodo anterior a la fibra dopada. Al llegar a la fibra dopada, el bombeo es absorbido por el Erblio amplificando la señal en ese punto. Por lo tanto se reduce la distancia de generación de ganancia distribuida Raman pero se combina a su vez con amplificación debida a la fibra dopada con Erblio.

Por tanto, dependiendo de la posición donde se intercale la fibra dopada se generará mayor amplificación de un tipo u otro [23].

5.4.1. Análisis del sistema con 125 km y 1 m de fibra dopada con Erblio (Er80) en el km 50.

La primera idea fue colocar una sección de un metro de fibra dopada con Erblio 80 (Liekki Er80) intercalada en el montaje, de cara a que junto con la ganancia Raman se generase ganancia con una forma espectral más plana en la zona de trabajo.

En la primera prueba se soldó la fibra dopada tras los primeros 50 km de fibra monomodo estando el tramo de fibra dopada con erblio bombeado remotamente con el bombeo Raman.

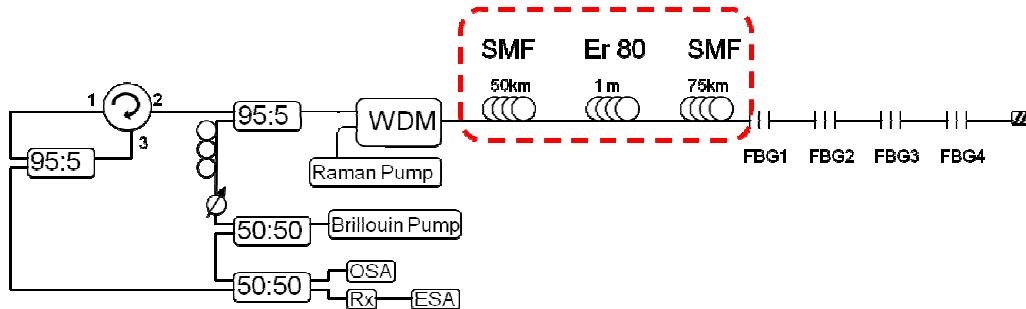


Figura 5.8. Montaje con 1 m de fibra fuertemente dopada tras 50 km de SMF

Inicialmente se observó que el espectro de ganancia crecía muy rápidamente y el sistema generó emisión láser espontáneamente a partir de 0.73 W de bombeo Raman. Este dato es interesante ya que en el caso anterior (sin fibra dopada con Erblio) la potencia de bombeo óptima era 0.85 W. Se tomaron las trazas en el OSA para un bombeo Raman de 0.70 y 0.85 W. A continuación se presentan comparadas con el caso anterior para un bombeo de 0.85 W sin el tramo de fibra dopada con Erblio ni EDFA.

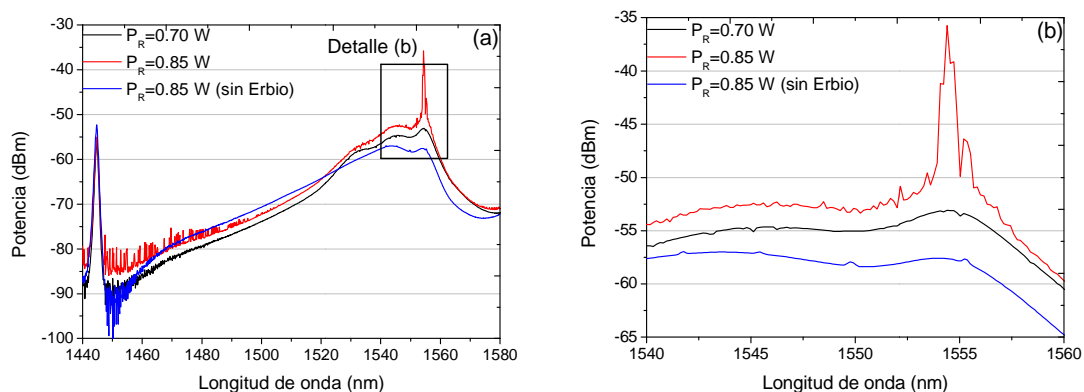


Figura 5.9. (a) Espectro en OSA para bombeos de 0.7 y 0.85 W frente al caso sin fibra dopada con Erblio con detalle de la zona de los sensores (b)

En los resultados obtenidos pueden verse varios efectos muy interesantes. En primer lugar, se obtiene mayor ganancia en la zona de trabajo para un bombeo de 0.70 W en el caso con fibra dopada con Erbio que en el caso óptimo del montaje anterior sin fibra dopada (con bombeo a 0.85 W). Sin embargo en esta ocasión los sensores no se distinguen ya que no están conectados al sistema en la toma de la traza. También puede verse cómo la forma de todo el espectro es diferente esta vez, al combinarse el espectro de ganancia Raman con el de la fibra dopada con Erbio. Esto supone que en la zona de trabajo se obtiene mayor ganancia, pero sin embargo la zona no es tan plana como en el caso anterior. Por tanto la zona de mayor longitud de onda tiene mayor ganancia y sus sensores reflejan más potencia que en el caso sin fibra dopada.

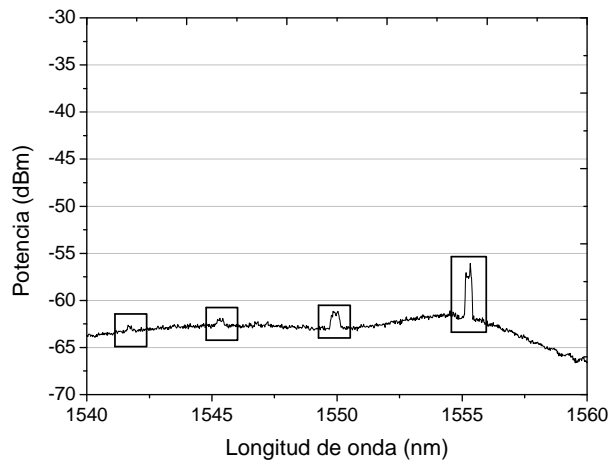


Figura 5.10. Taza del OSA con los sensores conectados (recuadrados)

Esto supone que a la hora de realizar las medidas se debía ecualizar independientemente cada sensor, no pudiendo medirlos simultáneamente para una misma ecualización. Sin embargo podían medirse correctamente de manera independiente con márgenes de relación señal-ruido de unos 20 dB, como se muestra por ejemplo para el caso de los sensores de 1549.5 y 1541.4 nm (Fig. 5.11).

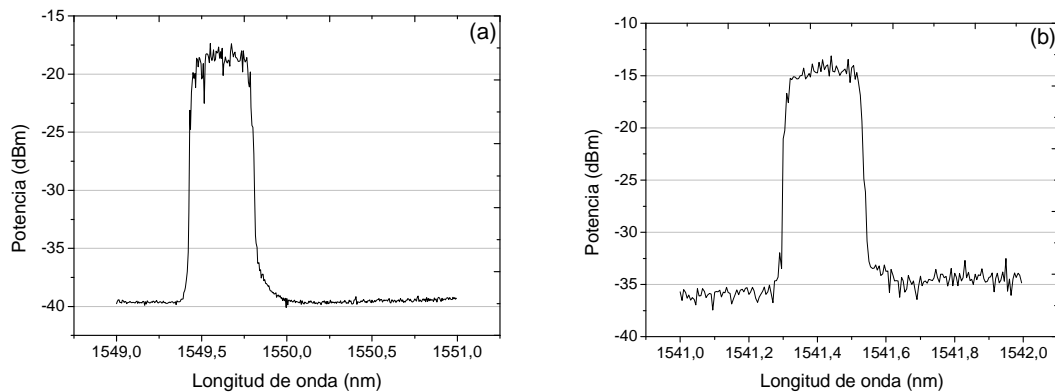


Figura 5.11. Medidas para el sensor de 1549.5 (a) y 1541.4 nm (b)

En definitiva, con la introducción de fibra fuertemente dopada con Erblio tras 50 km de fibra monomodo se consiguió interrogar los sensores con una SNR de 20 dB para un bombeo de 0.7 W, menor aún que el utilizado en la interrogación de 100 km (0.77 W) del capítulo II.

Como contrapartida se obtuvo un espectro menos plano en la zona donde se encuentran los sensores, lo que impidió que con un mismo ajuste del sistema se pudieran interrogar todos los sensores, aunque esto fuese posible individualmente.

5.4.2. Análisis del sistema con 125 km y 1m de fibra dopada con Erblio (Er80) en el km 75.

Se repitió el proceso del apartado anterior para estudiar la variación de los resultados dependiendo de la posición de la fibra dopada en el sistema. En esta ocasión la fibra se soldó tras 75 km de fibra monomodo estándar.

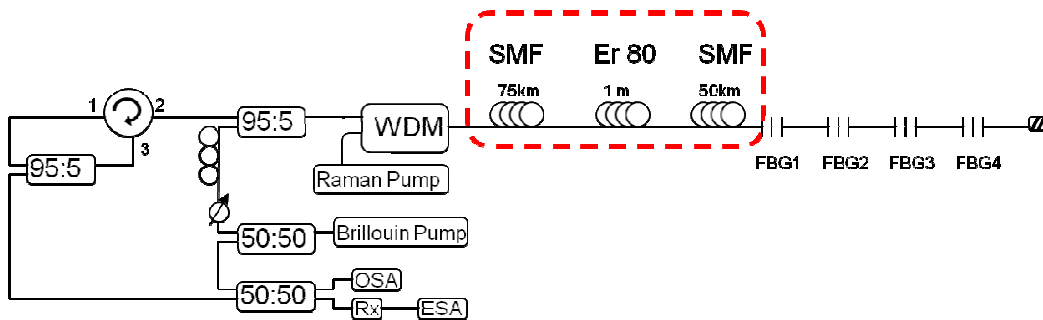


Figura 5.12. Montaje con 1 m de fibra fuertemente dopada tras 75 km de SMF

En esta ocasión se observó que la potencia para localizar los sensores en el OSA es de 0.98 W, mucho mayor en los casos anteriores.

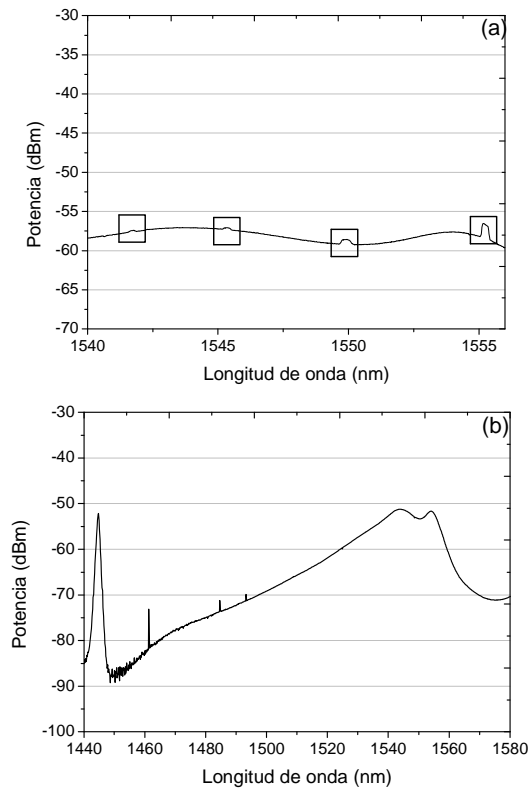


Figura 5.13. Trazas del OSA con los sensores conectados (a) y traza del espectro completo (b)

Se puede ver en la figura 5.13 (a) cómo de nuevo la alta potencia de bombeo Raman necesaria hizo que apareciera el valle de ganancia de 1550 nm que impidió realizar el barrido correctamente, al tener mayor ganancia en 1544 nm (fuera del sensor).

De la misma manera el espectro completo (Fig. 5.13 (b)) tiene una forma similar a los casos en los que no se incluía la fibra dopada con Erblio, no reconociéndose su aportación en ganancia, si es que la hay.

Por tanto, la conclusión a la que se llega es que la fibra dopada estaba demasiado alejada de manera que el bombeo que recibía no era suficiente para generar ganancia. De hecho introducía pérdidas ya que la potencia necesaria de bombeo Raman para localizar los sensores era mayor que en el caso de no incluir la fibra dopada.

Es decir, en estas condiciones la fibra dopada no genera ganancia sino que introduce pérdidas al no recibir el suficiente bombeo, por ello esta prueba carece de interés práctico.

5.4.3. Análisis del sistema con 125 km y 1 m de fibra dopada con Erblio (Er80) en el km 25.

En el caso anterior se vio que para valores moderados de bombeo Raman, la potencia que alcanza el kilómetro 75 de SMF no es suficiente para generar ganancia en la fibra fuertemente dopada.

Por tanto en la siguiente prueba la fibra dopada se colocó tras los 25 primeros kilómetros de fibra monomodo, donde es seguro que genera ganancia, ya que en 50 km la generó.

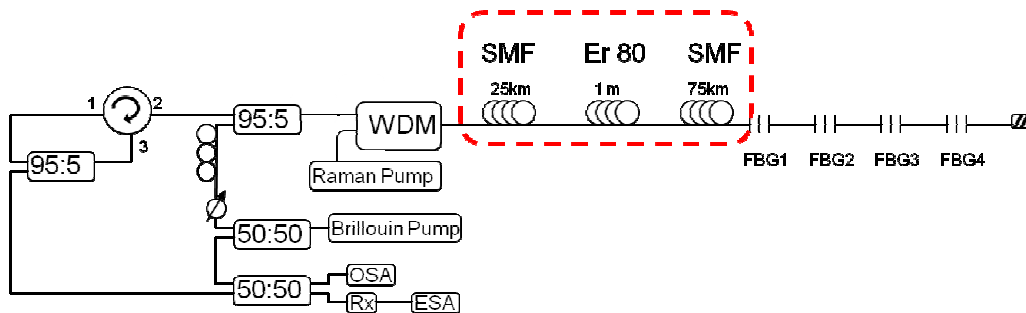


Figura 5.14. Montaje con 1 m de fibra fuertemente dopada tras 25 km de SMF

Sin embargo en esta ocasión la ganancia generada era demasiada, produciéndose un efecto similar a incluir el EDFA con mucha potencia. Esto generaba la emisión láser del sistema en las zonas de mayor ganancia a partir de 0.35 W de bombeo Raman.

La absorción y ganancia aportada por el trozo discreto de fibra amplificadora enmascara la medida y con 0.35 W la ganancia Raman no es suficiente para poder localizar los sensores.

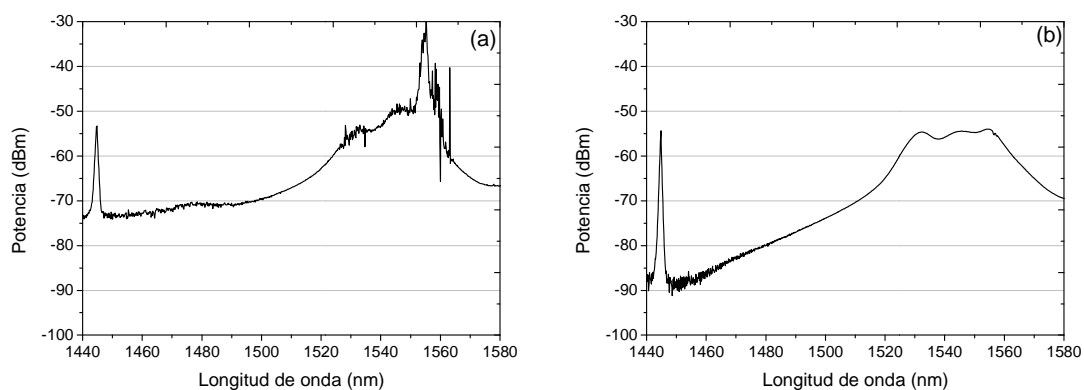


Figura 5.15. Espectro del montaje con fibra dopada tras 25 km de SMF para potencia de bombeo Raman de 0.70 (a) y 0.35 W (b)

De nuevo hay que decir que en estas condiciones no era posible realizar la medida siendo demasiada la ganancia aportada por la fibra dopada con Erblio, por tanto este

montaje también queda descartado viéndose que la distancia en la que la presencia de la fibra dopada favorece al montaje se encuentra en torno a los 50 km de la primera prueba.

Queda claro que la sección de fibra dopada debe colocarse en un lugar óptimo para que el bombeo que alcance ese punto sea justo el que permita alcanzar el máximo de ganancia. Sin embargo ésta, sumada a la ganancia Raman, no debe ser tal que provoque la emisión láser espontánea debida a la recirculación en las zonas de máxima ganancia.

Para encontrar este punto óptimo se realizaron numerosas pruebas para secciones de 1 y 3 metros de fibra dopada con Erblio 80 así como para 5 y 7 metros de fibra dopada con Erblio 30. En estas pruebas se fue ajustando el bombeo y la posición de los diferentes tipos de fibra, variando a su vez la longitud del sistema llegando al caso más interesante que se muestra a continuación.

5.4.4. Análisis del sistema con 155 km y 7 m de fibra dopada con Erblio 30 en el km 55

Tras las pruebas realizadas, se estudió este caso ya que la curva de ganancia generada nos permite localizar dos FBG situados en la zona de ganancia.

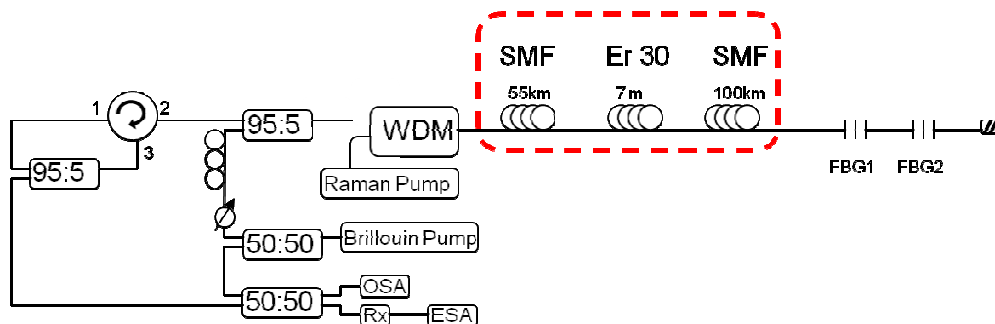


Figura 5.16. Montaje con 1 m de fibra fuertemente dopada (Er30) tras 55 km de SMF

El interés de este montaje está en que es el caso con mejores resultados obtenidos ya que pueden localizarse dos sensores para 155 km, la distancia más larga conseguida en todo el estudio.

Los sensores debieron colocarse en 1555.1 y 1553.5 nm ya que separándolos más no era posible medirlos en un sólo barrido para una misma ecualización, debido a la curva de ganancia tan acentuada. En cualquier caso esta separación es suficiente para aplicaciones como la monitorización de temperatura donde la distancia entre ambos sensores es de unos 150 °C (10 pm/°C).

Además la potencia de bombeo Raman utilizada para la interrogación de los sensores es muy pequeña, de 0.6 W, menor incluso que los 0.7 W utilizados en el caso de 100 km.

El problema que se vio en el montaje es la dificultad para realizar barridos correctamente debido a la gran variación en potencia del batido y en general a la inestabilidad en potencia del sistema, lo que dificulta la medida. Sin embargo, se incluyeron varias modificaciones que mejoraron notablemente las características del montaje.

5.5. Ajuste de la red de monitorización remota para dos sensores a 155 km utilizando amplificación Raman, Brillouin y de fibra dopada con Erbio

Como se ha visto en el montaje anterior, el sistema para 155 km ofrece unos resultados prometedores, aunque requiere de ajuste para lograr una toma de medidas fiable. Hay varios factores que influyen negativamente en la toma de medidas que serán tratados por separado para tratar de conseguir un buen ajuste del sistema:

- Inestabilidad en potencia.
- Generación de emisión láser espontánea en longitudes de onda indeseadas.
- Dependencia de la polarización.

5.5.1. Inestabilidad en potencia

Esta inestabilidad supuso uno de los mayores problemas a la hora de realizar la medida ya que se generaban picos de potencia que desvirtuaban la medida.

Ante la imposibilidad de evitar esos picos, se optó por realizar un promediado de la medida en cada muestra y así al menos las inestabilidades eran menos notables y no distorsionaban la medida.

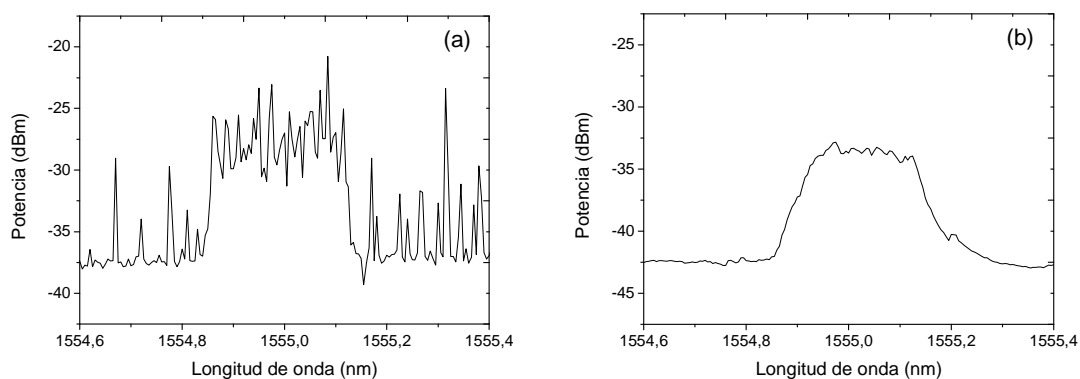


Figura 5.17. Medidas del sensor situado en 1555 nm sin (a) y con promediado.

Como puede verse en la figura anterior, la diferencia entre el barrido realizado con y sin promediado es muy notable. De hecho en el caso que no se realiza promediado los picos debidos a la inestabilidad alcanzan valores tan grandes que podrían dar un resultado falso en la medida del sensor.

Se estudiaron diferentes valores de entre 5 y 30 trazas promediadas en cada muestra, llegándose a la conclusión de que un promediado de 10 era suficiente para disminuir considerablemente el ruido en potencia pero a su vez a conservar lo mejor posible la forma del FBG sensor (Figura 5.18). Por tanto, en las pruebas posteriores se utilizó siempre un promediado de 10 trazas para cada muestra generada.

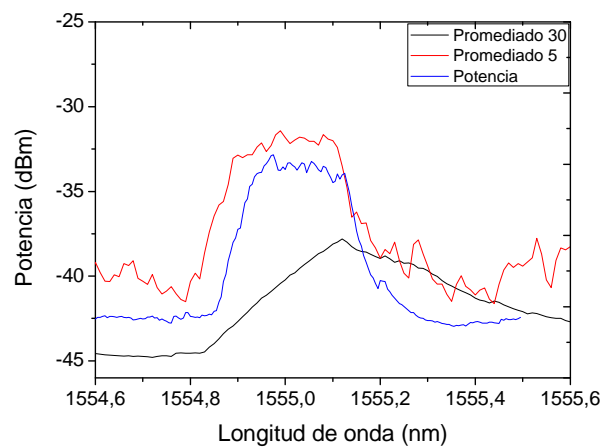


Figura 5.18. Comparación de diferentes tipos de promediados.

5.5.2. Generación de emisión láser espontánea en longitudes de onda indeseadas.

Este problema es una constante durante todo el estudio. Como ya se ha comentado la generación de emisión láser indeseada en longitudes de onda arbitrarias fuera del sensor se debe a que la ganancia para esas longitudes de onda es mayor que las pérdidas, debido a la recirculación de la señal.

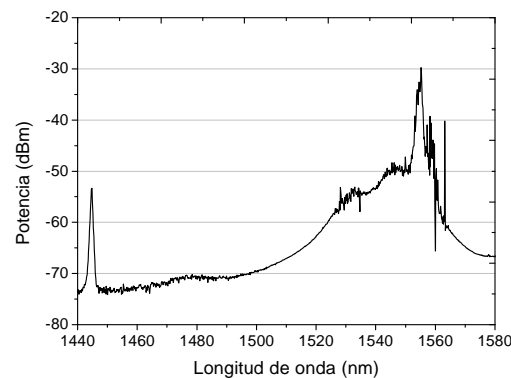


Figura 5.19. Efecto de emisión láser indeseada en 1555 nm.

Esto limita la potencia de bombeo introducida en el sistema, ya que si el bombeo supera un límite, genera la suficiente ganancia como para provocar este tipo de emisión.

Para evitar esto se trató de evitar la recirculación de todas las longitudes de onda en el espejo formado por el circulador. Para ello se introdujo en el montaje antes del espejo un filtro paso-banda autosintonizable, es decir, automáticamente se engancha a un pico de potencia (en nuestro caso el LS) y lo sigue durante el barrido.

Sin embargo, el filtro era demasiado estrecho por lo que aunque el seguimiento era correcto, la menor variación en el movimiento provocaba que el LS y su onda de Stokes no entrasen dentro del ancho de banda del filtro resultando atenuadas y por tanto, la medida era incorrecta.

La alternativa fue de nuevo incluir un filtro óptico paso banda sintonizable con un ancho de paso a -3dB de 1 nm que se desplazara solidariamente con el desplazamiento del láser sintonizable durante el barrido.

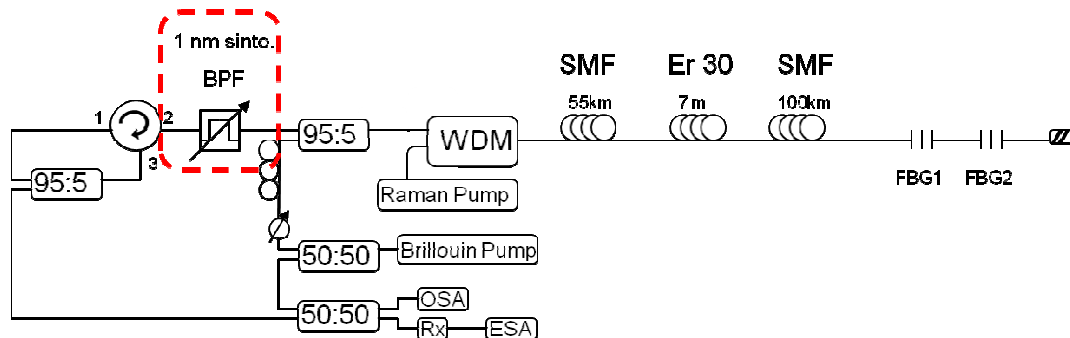


Figura 5.20. Montaje para 155km con BPF sintonizable.

Las mediciones al introducir este filtro fueron notablemente mejores que en los casos anteriores, disminuyéndose la pendiente propia del perfil de ganancia en torno a 1555nm. De la misma manera fue posible introducir algo más de bombeo sin que se produjese emisión láser indeseada. Por lo tanto, se incluyó definitivamente el filtro en el montaje.

En el apartado (a) de la siguiente figura se pueden observar los diferentes espectros del sistema vistos en el OSA. En todas las trazas puede verse claramente el efecto de introducir el BPF en la cavidad, recirculándose tan sólo las longitudes de onda de la banda de paso. En la traza roja puede observarse el espectro sin la presencia del láser sintonizable, lo que permite localizar la posición del sensor.

En la medida de color negro puede verse la misma situación pero con el LS conectado y situado sobre el FBG, excitándose la onda de Stokes gracias a la ganancia Brillouin, así como una pequeña parte de anti-Stokes. También puede notarse la diferencia de potencia en el perfil de los casos con y sin LS. Esto se debe a que el perfil

de ganancia que genera la fibra dopada con Erblio es elástico y la presencia de una señal que recibe gran parte de esa ganancia disminuye el perfil del resto.

En la traza azul puede verse el láser sintonizable junto con el BPF situado fuera del sensor excitándose menos potencia en la réplica de Stokes.

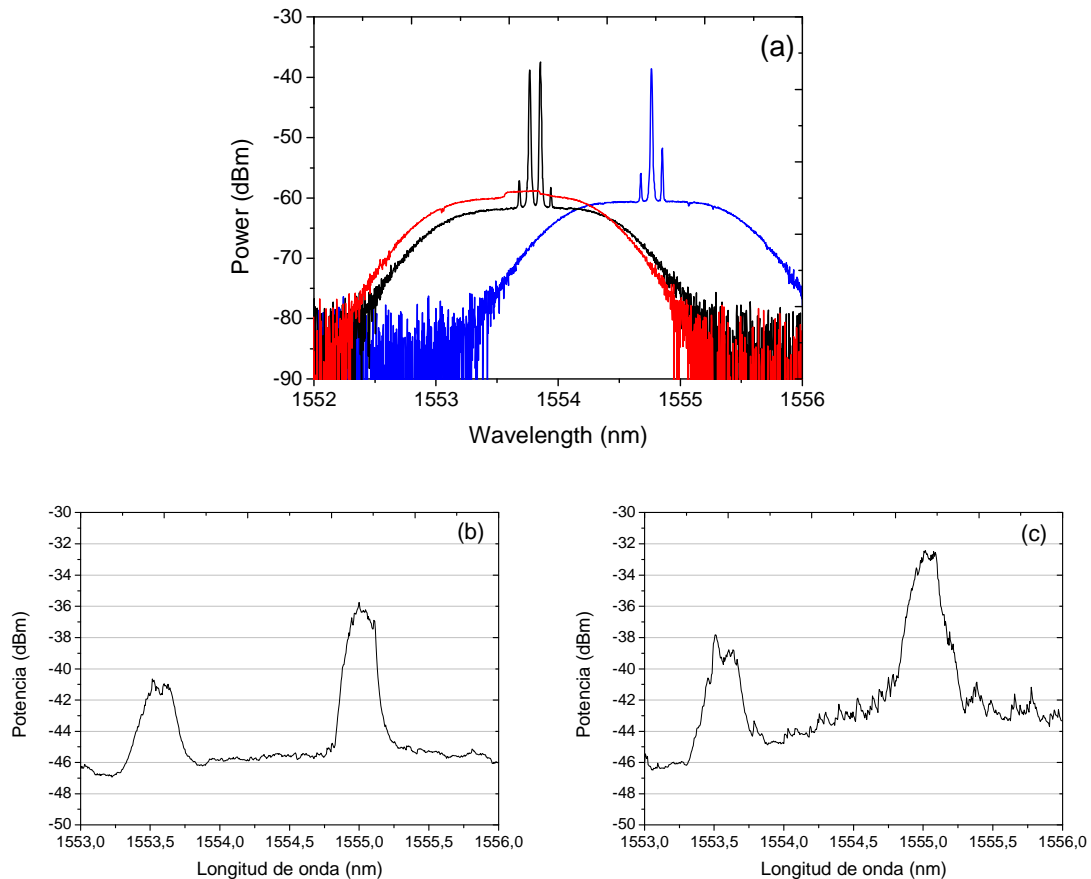


Figura 5.21. (a) Espectro de ganancia con o sin LS sobre el sensor visto en el OSA. (b) Medida del sistema con BPF en el montaje. (c) Medida del sistema con BPF en el montaje.

En la figura 5.21 (b) puede observarse cómo mejora notablemente la estabilidad de la zona de trabajo respecto a las medidas sin el filtro paso-banda (figura 5.21 (c)). Sin embargo hay gran diferencia entre la potencia recibida en ambos sensores. Tras repetir las medidas para diferentes configuraciones del control de polarización se observó que este efecto estaba relacionado con la polarización, por lo que se estudió su influencia.

5.5.3. Dependencia de la polarización

Como se ha dicho, se pudo observar que el factor más influyente en la diferencia de potencia obtenida en los dos sensores se debía a la polarización. Se llegó a esta conclusión ya que el procedimiento previo a la toma de una medida era el ajuste del

control de polarización para lograr la máxima señal en recepción en uno de los dos sensores. Esto suponía que en el sensor ajustado se obtenía una gran relación señal a ruido, sin embargo, en el otro sensor la potencia no era máxima.

Por ello, para comprobar el razonamiento se sustituyó el control de polarización por un *polarization scrambler* cuya función era generar una polarización aleatoria a una velocidad de hasta 6000 veces por segundo. Esto supone que la polarización del LS introducida en el sistema es aleatoria, por tanto a efectos prácticos es igual para ambos sensores.

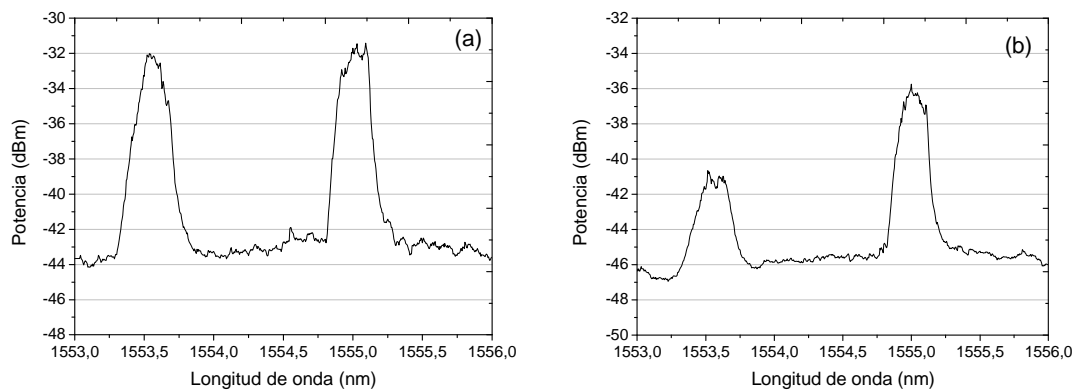


Figura 5.22. Medidas de interrogación de dos sensores con y sin *polarization scrambler* respectivamente.

Como puede verse en las figuras aunque sigue existiendo diferencia entre las potencias de ambos picos, no es tan notable como en el caso de utilizar el control de polarización. Por tanto, toda dependencia de la polarización se ha eliminado, permitiendo unas medidas más equilibradas y obteniéndose una relación señal a ruido de más de 10 dB para ambos sensores.

5.6. Montaje final para 155 km y comprobación del sistema como sensor de temperatura

Tras el estudio del apartado anterior se ha incluido en el sistema un *polarization scrambler* sustituyendo el control de polarización y también se ha introducido el filtro paso banda.

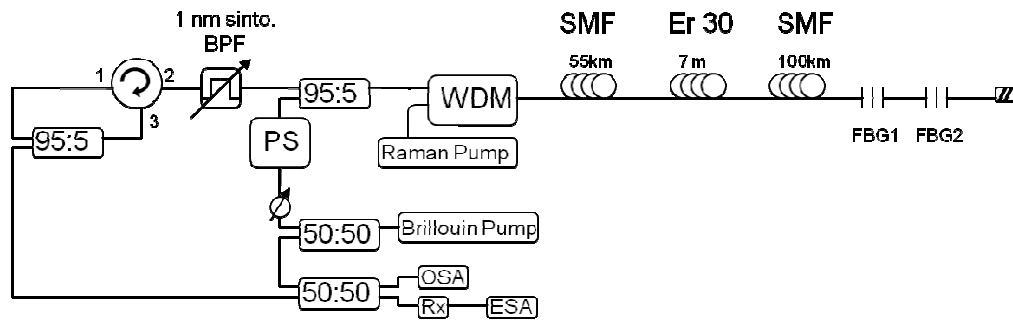
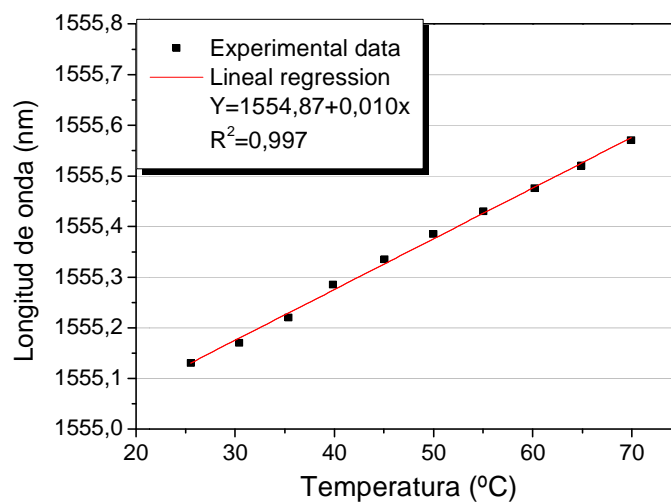


Figura 5.23. Montaje final para dos sensores situados a 155 km

De esta manera se han conseguido interrogar remotamente dos sensores FBG situados a 155 km de la fuente de bombeo Raman. Este bombeo emite una potencia de 0.6 W generando ganancia Raman, Brillouin y amplificación debida a los 7m de fibra dopada con Erblio situados en el kilómetro 55. El barrido obtenido posee una SNR de más de 10 dB en ambos sensores.

Por último, al igual que se hizo para el montaje de 100 km, se comprobó la utilidad del sistema como sensor de temperatura. Para ello se introdujo el FBG situado en 1555 nm en una cámara climática y se realizó un barrido para cada aumento de 5°C en la temperatura.



Equation	$y = a + b \cdot x$		
Adj. R-Square	0,997		
	Value	Standard Error	
Wavelength	Wavelength	1554,87498	0,00911
Wavelength	Wavelength	0,01002	1,83237E-4

Figura 5.24. Ajuste lineal del barrido de temperatura y tabla con los valores del ajuste

Como puede verse en el ajuste, el sistema es claramente lineal y responde perfectamente a la variación en temperatura con un desplazamiento de $10\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ y un error por medida de en torno a 1°C , exactamente igual que ocurría para 100 km. Por tanto queda demostrada la viabilidad de este nuevo montaje para la interrogación remota de dos sensores.

5.7. Resumen, conclusiones y futuras líneas de investigación

El objetivo de este capítulo era investigar nuevas mejoras en el sistema de interrogación a raíz de incluir ganancia procedente de fibra dopada con Erblio. Así se pretendía incorporarlas posteriormente en sistemas de mayor distancia donde en las condiciones estudiadas en el capítulo anterior no se podían interrogar sensores. En esta búsqueda se ha partido del último punto estudiado con resultados interesantes para 150 km, que es la introducción en el sistema de un amplificador de fibra dopada con Erblio.

Por tanto, en este capítulo se ha comenzado estudiando el efecto de incluir el EDFA en el sistema, comprobándose que con un ajuste adecuado, muy preciso y diferente para cada montaje, puede lograrse una ligera mejora en el sistema. También se ha comprobado que el efecto de introducirlo apagado en el anillo evita o retrasa la aparición de la emisión láser parásita debido a que el EDFA puede actuar, si no se bombea suficientemente, como un atenuador en la recirculación que varía en función de la longitud de onda. Por tanto mediante su introducción se puede modificar la respuesta del sistema ligeramente atenuando la ganancia para longitudes de onda bajas y aumentando ligeramente las altas.

El siguiente paso ha sido estudiar la influencia de incluir en el sistema secciones de fibra fuertemente dopada con Erblio (Liekki Er 80 y Er 30). Esta fibra puede bombearse simultáneamente con el bombeo Raman introducido en el sistema de manera que se pueda generar ganancia de manera remota colocando la fibra intercalada en la fibra monomodo.

Se ha comprobado que dependiendo de la posición del tramo de fibra dopada la potencia de bombeo que alcanza a la fibra dopada puede no ser suficiente para generar ganancia, siendo perjudicial para el montaje. De la misma manera se ha visto que si la posición es demasiado próxima la ganancia generada es demasiado alta generando la propia emisión láser indeseada del sistema.

Lo más interesante ha sido comprobar que para una distancia adecuada la presencia de la fibra dopada genera alta ganancia y modifica el espectro en la zona de trabajo. En el mejor caso investigado se ha conseguido interrogar remotamente dos sensores situados a 155 km del bombeo. Para ello ha sido necesario incluir 7 m de fibra dopada con Erblio (Liekki Er 30) en el kilómetro 55 del montaje. Además, para solucionar problemas de inestabilidad en potencia se ha considerado necesario realizar un

promediado de 10 muestras en la toma de medidas. También ha sido necesario incluir un filtro paso banda sintonizable que se desplace solidariamente con cada paso del barrido del láser sintonizable. Su función es evitar la recirculación de longitudes de onda innecesarias en la medida, estabilizando el sistema y evitando la emisión láser indeseada de las longitudes de onda con más ganancia. Por último, se ha sustituido el control de polarización del sistema por un *polarization scrambler* que genera una polarización aleatoria en la señal del LS, lo que elimina la dependencia de la polarización del sistema, permitiendo medidas más equilibradas para ambos sensores. Todo esto ha permitido interrogar dos FBG con una relación señal a ruido de más de 10 dB para un bombeo Raman de 600 mW. Esto supone un ahorro de potencia frente a los 700 mW necesarios para la interrogación del montaje de 100 km visto en el capítulo III.

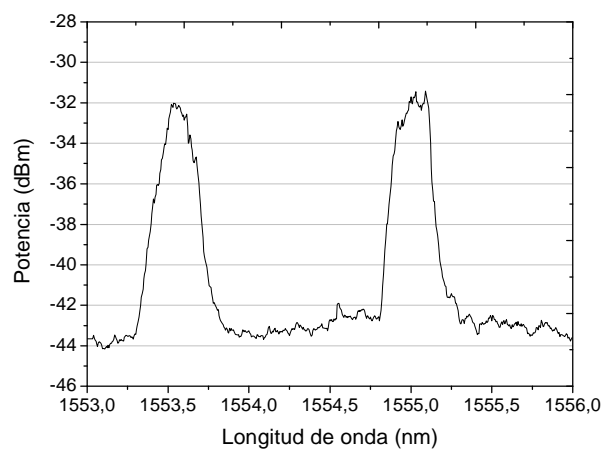


Figura 5.25. Medida de dos sensores para una distancia de 155 km.

Respecto a la posible continuación del estudio, existen varias líneas de investigación para avanzar con el desarrollo del sistema y alcanzar mayores distancias de monitorización.

Las más inmediatas serían el ajuste de las mejoras vistas en este capítulo aplicadas al montaje de 155 km incluyendo fibra dopada con Erblio intercalada en la fibra monomodo. Debería estudiarse el punto en el que incluirse, así como los valores de potencia de bombeo Raman usados. De esta manera, podría realizarse un estudio concienzudo de la potencia necesaria de bombeo para lograr la máxima ganancia de la fibra dopada con Erblio. Así se podrían aumentar los kilómetros de fibra monomodo anteriores a la fibra dopada, aumentándose la ganancia generada por efecto Raman, manteniéndose máxima la amplificación generada por el Erblio. Adicionalmente se debería analizar la utilización de filtros que atenúen adecuadamente el espectro conseguido, que pudieran ser realizados con fibras de cristal fotónico o LP-FBGs. La utilización de un bombeo doble como se realizó en [24] podría también reducir el ruido del sistema. De la misma manera podría estudiarse la utilización de algún tipo de modulación del láser de bombeo Brillouin que pudiera mejorar la respuesta del sistema.

Sección III

Láser en anillo de fibra dopada con erbio para operación monomodo en doble longitud de onda

CAPÍTULO VI

Descripción del láser en anillo de fibra dopada con Erbio para operación monomodo en doble longitud de onda

6.1. Introducción

Los láseres en anillo de fibra dopada con Erblio para operar en régimen monomodo de manera estable son fuentes muy útiles para muchas aplicaciones de caracterización de fibra óptica, redes de multiplexación de sensores y test de instrumentos. Estos láseres tienen muchas ventajas, como su estructura simple, anchura de línea estrecha y compatibilidad con otros componentes de fibra óptica [10, 25].

La selección de las longitudes de onda de operación se logra mediante diferentes técnicas: Filtros Mach-Zender, absorbentes saturables, o redes Bragg (FBGs) [26-28]. Además, se usan muchos métodos para aumentar el número de líneas de emisión estables.

Los láseres en anillo de fibra dopada con Erblio normalmente generan muchos modos longitudinales alrededor de la longitud de onda central del láser debido al gran tamaño de la cavidad. Esto puede limitar sus aplicaciones prácticas debido a la competición entre modos y el salto intermodal (*mode hopping*). Conseguir en estas estructuras la operación monomodo ha sido el objetivo de muchos y variados estudios [29-31].

Los láseres de fibra con configuración en anillo poseen cierta inestabilidad para la potencia de salida. Esto puede degradar el rendimiento de una red de sensores basada en la interrogación mediante láser, sin embargo la optimización de láser en anillo puede mejorar considerablemente estas características.

En esta sección se va a estudiar el láser en anillo de fibra dopada con Erblio para operar en monomodo con doble longitud de onda propuesto en el artículo de M. Angeles Quintela “*Stabilization of Dual-Wavelength Erbium-Doped Fiber Ring Lasers by Single-Mode Operation*” publicado en “*IEEE Photonics Technology Letters*” el 15 de marzo del 2010. [32]. El objetivo es en primer lugar lograr la réplica del montaje realizado en el artículo y obtener resultados similares. Una vez obtenidos se trabajará sobre el montaje realizando pruebas para intentar estudiar la naturaleza del efecto que produce la estabilización instantánea de ambas ondas y el paso a operación monomodo. También se plantearán diferentes modificaciones al montaje y el cambio de ciertas condiciones para observar la respuesta del sistema.

6.2. Estudio preliminar

En primer lugar se estudiará el montaje original propuesto en el artículo de Quintela y su modo de funcionamiento, que será el punto de partida para las posteriores modificaciones y estudios.

La configuración del láser está basada en la conexión en serie de FBG utilizando circuladores ópticos. El medio activo de amplificación es fibra dopada con Erblio, y la

topología utilizada ya se había estudiado antes [33, 34], sin embargo no se había demostrado que el sistema estuviese operando en régimen monomodo.

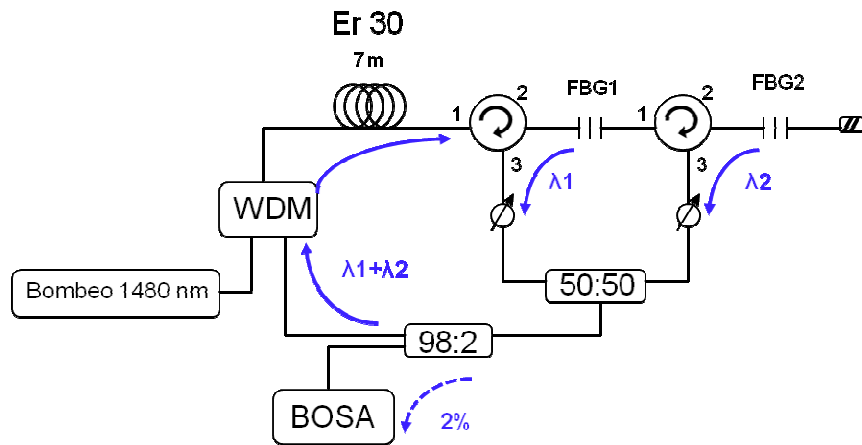


Figura 6.1. Esquema original y funcionamiento del láser en configuración de anillo.

La selección de las dos longitudes de onda se realiza mediante dos FBGs situados en el montaje original en 1543.6 y 1550.9 nm con una reflectividad del 98%. La fibra dopada con Erblio es de la casa Liekki Er-30 con una absorción de 30 dB/m a una longitud de 1530 nm. La longitud de la fibra dopada es de 7 m y la del montaje en total de unos 14 m. Debido a la alta concentración de Erblio en esta fibra la longitud necesaria de la cavidad es menor que en otras ocasiones [33]. En el montaje también se incluye un WDM 1480/1550 para introducir en el sistema el bombeo en 1480 nm. Uno de los mayores problemas en los láser multi-lambda configurados en anillo es que la potencia umbral de oscilación para cada longitud de onda es diferente debido a la falta de uniformidad del espectro de ganancia del Erblio. Por este motivo se introduce un atenuador variable en cada rama, para ajustar las pérdidas en la cavidad en cada longitud de onda. Por último, todas las terminaciones libres del sistema se han adaptado con gel adaptador de índice para evitar posibles reflexiones.

El funcionamiento del sistema es sencillo; se basa en la recirculación de la señal en un anillo donde la fibra dopada con Erblio como medio activo genera ganancia gracias al bombeo a 1480 nm. Tras la fibra amplificadora se encuentra el primer circulador que pasa la señal desde el puerto uno al dos, donde se encuentra con el primer FBG. Éste refleja la primera longitud de onda que vuelve por el puerto dos hacia el tres donde es atenuada por el atenuador variable y llega al acoplador 50:50. El resto de la potencia no reflejada por el primer FBG continúa hacia el segundo circulador donde se refleja su longitud de onda, continúa por la rama con el atenuador variable y llega al acoplador donde se une a la longitud de onda de la otra rama. La potencia no reflejada en los FBG continúa hacia la terminación adaptada con gel, en donde se pierde.

Tras el acoplador se tienen las dos longitudes de onda reflejadas de manera selectiva. A continuación se extrae un 2% de la señal que es analizada y el resto

continúa de nuevo hacia el WDM donde se suma al bombeo y vuelve a amplificarse, completando el anillo que permite que el sistema llegue a oscilar.

Para el análisis de la potencia extraída se utilizó un analizador de espectros ópticos de alta resolución (BOSA) con una resolución de 0.08 nm y un rango dinámico de más de 80 dB. La potencia que se obtiene con ambos canales correctamente configurados es de -16 dBm para ambos, 45 dB mayor que el ruido. La potencia utilizada de bombeo es de 45 mW para conseguir el umbral de oscilación láser, sin embargo se utilizan niveles de bombeo mayores para aumentar la estabilidad en potencia [34] realizándose las pruebas desde 45 hasta 100 mW

En el estudio se demuestra en primer lugar que la resolución es menor que la distancia entre modos, de manera que se pueda considerar que la señal es monomodo. Para ello se hace uso de la ecuación:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{nL}$$

Donde n es el índice de refracción, L es la longitud del anillo y λ es la longitud de onda central.

A continuación se muestra en el artículo cómo para el sistema funcionando para una única longitud de onda (la otra atenuada), el comportamiento del láser es claramente multimodo y la anchura de línea de éste crece al aumentar la potencia de bombeo. Esto se debe a que al generarse mayor ganancia en el sistema, mayor es el número de modos generados que superan el umbral $\text{ganancia}=\text{pérdidas}$ necesario para la emisión láser.

Sin embargo, cuando se pasa a operar en las dos longitudes de onda simultáneamente y éstas se ecualizan a una misma potencia se observa cómo el resto de modos desaparecen pasando ambas emisiones a operar en monomodo. Además en el estudio se afirma que este efecto también ocurre al sustituir uno de los FBG por un láser sintonizable y que este efecto es independiente de la separación de los FBG siempre que las potencias de ambos estén igualadas.

6.3. Adaptación y réplica del montaje

Se ha explicado el montaje y conclusiones sobre el efecto de conseguir dos láseres monomodo mediante un láser de fibra en anillo amplificado con fibra dopada con Erblio. El objetivo a continuación es replicar el montaje para realizar un estudio pormenorizado y posibles variaciones.

Sin embargo, debido al coste de los componentes y la falta de algunos de ellos, especialmente el BOSA, es necesaria la modificación y adaptación del montaje al

material y recursos disponibles. Las modificaciones que hay que realizar deben sustituir los siguientes componentes:

- BOSA
- Bombeo en 1480 nm
- Localización de los FBG

Los FBG utilizados estarán centrados en diferentes longitudes de onda que los utilizados en el artículo, pero tal y como se indica esto no debería tener influencia en los resultados siempre que se encuentren dentro de la zona de ganancia del Erblio.

El bombeo, a falta de una fuente en 1480 nm se hará en 980 nm. Por lo tanto los valores de bombeo utilizados no serán exactamente comparables a los del artículo.

En cuanto a la sustitución del BOSA, esto supone una mayor complicación. El problema es que la resolución máxima del OSA disponible es de 0.01nm y la distancia intermodal será mucho menor (décimas de picometro), de manera que no podemos comprobar que sea o no monomodo. Para ello necesitamos medirlo con mayor resolución.

La idea es utilizar la técnica del heterodinaje para poder observar el batido del láser generado con el de un láser sintonizable de referencia. Recordemos que el heterodinaje es un proceso mediante el cual se superponen dos ondas de frecuencias diferentes (aunque próximas) para obtener una única onda de amplitud dependiente del producto de ambas y a una frecuencia de valor igual a la diferencia de las frecuencias de las ondas que se combinan. Por tanto si desplazamos un láser sintonizable de referencia a zonas cercanas del láser generado, observaremos una señal dependiente del módulo de ambas y a una frecuencia diferencia, por lo que podremos situarla en la zona del espectro de RF que nos convenga para su análisis simplemente desplazando el LS.

Para que los resultados obtenidos sean precisos el láser sintonizable de referencia debe ser lo más estrecho posible y estable en potencia. Para ello utilizaremos un láser sintonizable modelo Agilent 8164B con una anchura de línea de 100 kHz. Por su parte el espectro lo recibiremos en un fotodetector de hasta 12 GHz que lo convertirá al dominio eléctrico donde lo analizaremos con un analizador de espectros eléctrico con una resolución de hercios, que nos permitirá alcanzar una resolución suficiente para asegurar la operación monomodo.

La pega es que no se podrán visualizar las dos emisiones láser simultáneamente, sino que solo se podrá comprobar una cada vez, la que se aproxime a la longitud de onda del láser sintonizable. Sin embargo se colocará también el OSA para obtener la ecualización y observación preliminar.

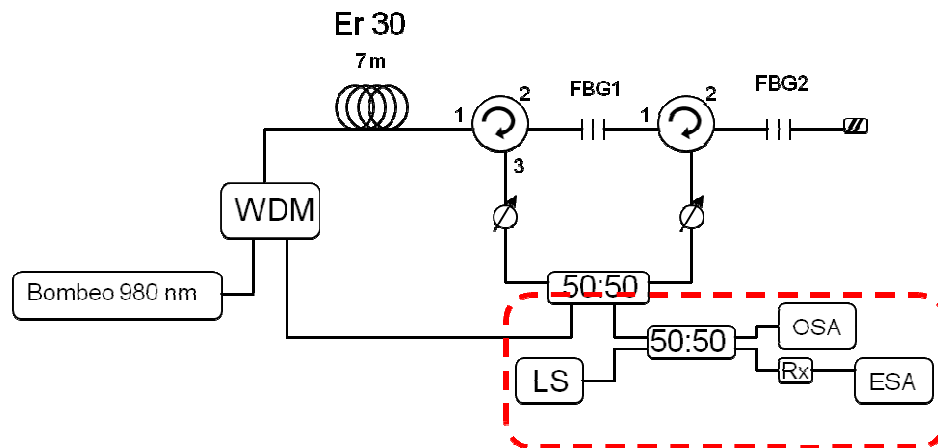


Figura 6.2. Montaje del láser en anillo con medición mediante heterodinaje

Además para extraer la señal se utiliza la conexión que quedaba libre en el acoplador 50:50 en vez de introducir un 98:2. De esta manera se recircula algo más de potencia mientras que la señal extraída es 17dB mayor.

A continuación se estudiarán los resultados experimentales del sistema y se comprobará si el sistema reproduce el efecto de láser monomodo ante la equalización de las dos emisiones.

CAPÍTULO VII

Resultados experimentales del láser en anillo de fibra dopada con Erbio para operación monomodo en doble longitud de onda

7.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es en primer lugar el análisis de pruebas para tratar de observar el efecto monomodo cuando las dos emisiones láser se ecualizan. Además se comprueban el resto de afirmaciones del artículo estudiado en el capítulo anterior para a continuación tratar de comprobar que se ha replicado el montaje para condiciones parecidas, aunque no iguales.

El material utilizado para la realización de las pruebas de este capítulo ha sido el siguiente:

- Analizador de espectros óptico (OSA) Advantest Q8384
- Analizador de espectros eléctrico (ESA) R&S FSP30 (1093.4495.30)
- Fotodetector NewFocus 1544B
- Láser de bombeo 980 nm Amonics ALD98-100-B-FA
- Láser sintonizable Agilent 8164B
- Láser sintonizable Ando AQ8201-13
- Sección de 7 m de fibra dopada con Erblio 30 de Liekki.
- Redes de difracción Bragg centradas 1538.5, 1540, 1555 y 1541.5nm respectivamente y reflectividad del 99%.
- Circuladores de tres puertos.
- Multiplexor de longitud de onda (WDM) 980nm/1550nm
- Acopladores de 50:50
- Atenuadores variables
- Controlador de polarización.
- Gel adaptador de índice

7.2. Análisis del montaje

El primer montaje estudiado es el visto en el capítulo de introducción, donde respecto al montaje original se incluye la detección mediante heterodinaje ya comentada. Los FBG utilizados en estas primeras pruebas se situaron en 1538.5 y 1541.5 nm.

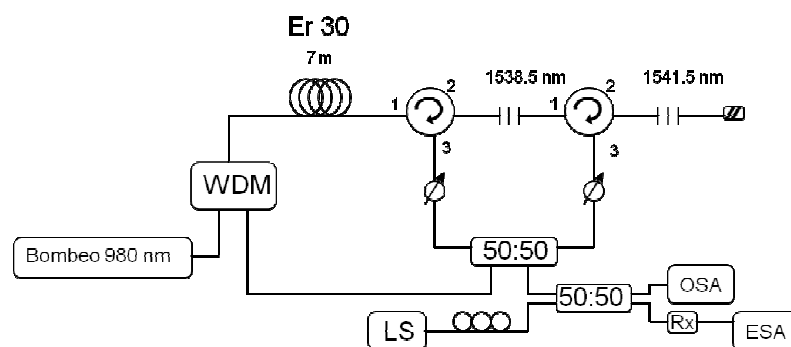


Figura 7.1. Montaje réplica de prueba.

En primer lugar se pudo observar cómo al ir aumentando la potencia del láser de bombeo de 980nm, se generaban las dos líneas de emisión correspondientes a los FBG. Sin embargo la línea de emisión en 1541 nm aumentaba más rápidamente que la otra, que apenas lo hacía. Este efecto es debido a la mayor amplificación generada por la fibra dopada en la zona de 1540 nm, lo que ocasiona que sea esta línea la que más fácilmente supere el umbral de *ganancia=pérdidas* necesario para la emisión láser dentro del anillo.

Para evitar este efecto y equilibrar ambas líneas de emisión se encuentran los atenuadores variables incluidos en cada rama. De esta manera pueden variarse manualmente para equilibrar en potencia ambas líneas de emisión.

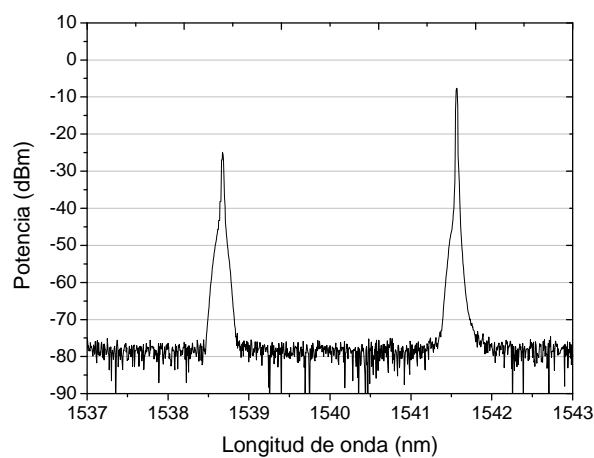


Figura 7.2. Líneas de emisión de los FBG sin ecualizar vistas en el OSA.

En la figura anterior puede verse cómo el sistema estaba sin “ecualizar”, es decir, las dos líneas de emisión tienen potencias diferentes. Si se acerca el láser sintonizable al primer FBG puede observarse en el ESA el batido de la línea de emisión con el LS. En esta situación el problema que aparece es cómo saber si esta línea de emisión es o no monomodo.

7.2.1. Línea de emisión monomodo y distancia intermodal

Lo primero que debemos saber es la distancia intermodal generada en el anillo de manera aproximada, para utilizar una resolución en el ESA que permita discernir los diferentes modos. Como ya vimos la fórmula utilizada es la siguiente:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{nL}$$

Para la aproximación utilizaremos un índice de refracción n de 1.45, una longitud de onda central λ de 1540 nm. La longitud efectiva la aproximaremos a la real más larga,

ya que hay que tener en cuenta que existen dos anillos en el montaje. Puesto que la longitud real del primer anillo es de 17 metros y 20 para el segundo, tomaremos 20 m para el cálculo.

Por tanto, esto nos resulta en una distancia intermodal $\Delta\lambda=0.082$ nm, como ya intuimos, menor que la resolución máxima del OSA. Esta distancia intermodal, para una longitud de onda de 1540 nm se corresponde con aproximadamente 10.3 MHz. Por tanto, para comprobar si el láser es monomodo es suficiente con utilizar una resolución en el ESA de 1 MHz. Tomamos un margen de error considerable ya que la longitud efectiva puede ser algo mayor que la real tomada para el cálculo.

En definitiva, es suficiente utilizar cualquier resolución en el ESA menor o igual que 1MHz para comprobar que el láser sea monomodo. También hay que tener en cuenta que el láser sintonizable tiene una anchura de 100 KHz, por lo que la utilización de resoluciones menores que ésta carece de interés.

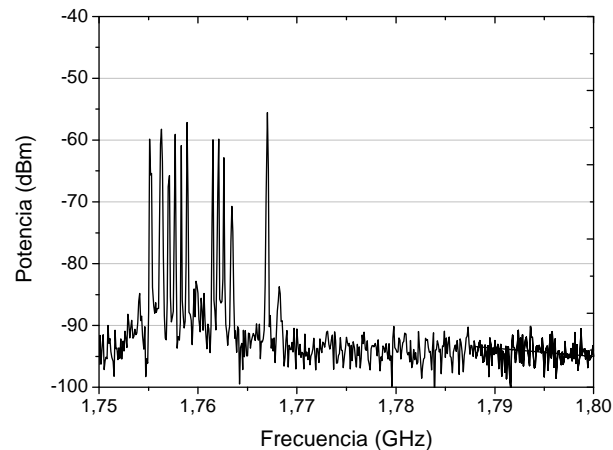


Figura 7.3. Trazo instantánea del batido del láser sintonizable con el FBG situado en 1538 nm con el sistema sin ecualizar en potencia (resolución 100 kHz).

En la figura anterior puede verse de manera evidente cómo en la situación de desigualdad en potencia vista en la figura 7.3, la línea de emisión generada por el FBG de 1538 nm es multimodo. Nótese cómo si en la traza anterior se hubiese tomado una resolución de 10 MHz, la línea podría ser erróneamente considerada monomodo.

7.2.2. Implicaciones del heterodinaje.

Otro factor importante para la interpretación de la señal vista en el ESA durante las pruebas es el hecho de que los diferentes modos de una señal multimodo se batan entre ellos generando a su vez señal eléctrica en frecuencia muy baja en el ESA.

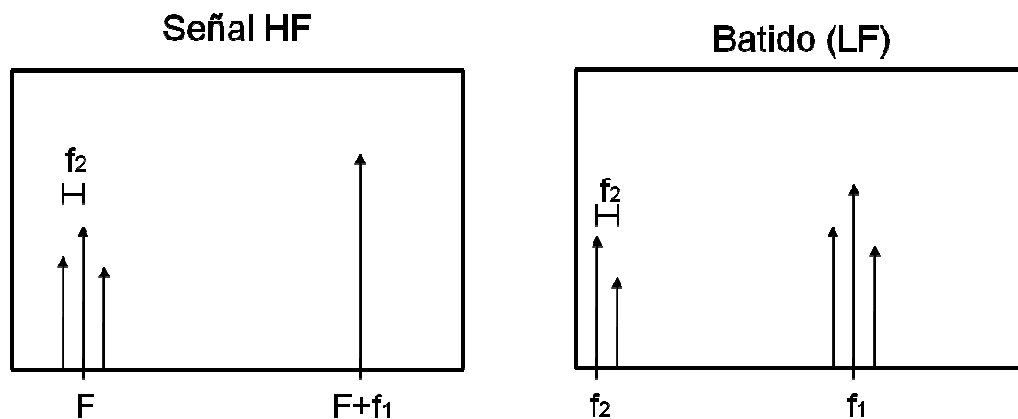


Figura 7.4. Representación esquemática del proceso de heterodinaje

Este efecto puede verse esquemáticamente en la figura anterior. En este esquema la señal multimodo a batir se encuentra a frecuencia F (alta frecuencia, HF), separada una frecuencia f_1 del láser sintonizable utilizado para batirla. A su vez, los diferentes modos de la señal se encuentran separados una frecuencia f_2 entre sí.

La señal resultante del batido se sitúa en baja frecuencia (LF). La réplica de la señal multimodo se encuentra en frecuencia f_1 mientras que a frecuencia f_2 y $2f_2$ aparecen los batidos producidos entre sí por los modos de la señal. En nuestro caso, la señal a batir se encuentra en torno a 195 THz (1540 nm), y acercaremos el LS a unos 5 GHz de separación, así obtendremos la señal batida en baja frecuencia en 5 GHz. De la misma manera en caso de que la señal batida sea multimodo, se obtendrán batidos a baja frecuencia hasta las centenas de megahercios dependiendo de la cantidad de modos excitados y su potencia.

Puesto que sólo podemos visualizar una línea de emisión láser acercándonos con el LS cada vez, esta característica es muy importante ya que nos da información del estado de ambas emisiones. El hecho de ver batidos a baja frecuencia significa inequívocamente que una de las dos líneas de emisión del sistema es monomodo.

7.2.3. Saltos frecuenciales

Durante las primeras pruebas en el montaje se observó que el batido obtenido saltaba constantemente en frecuencia independientemente de que la señal fuese monomodo o no. Los saltos eran incluso de varios gigahercios, siendo complicado en ocasiones distinguir el batido entre modos del batido con el LS. Este hecho además dificultaba las medidas, sobre todo de cara a comparar el comportamiento del sistema en diferentes condiciones.

Para poder contrastar las diferentes medidas hubo que buscar la manera en que los saltos en frecuencia pudieran reflejarse en la traza. Por tanto, para registrar estas

variaciones en la traza se activó la opción del ESA *max hold* que guarda el máximo valor obtenido para cada muestra, durante el tiempo que esta opción esté activado. En nuestro caso tomamos trazas para 5 y 15 segundos.

También se decidió que para todas las medidas la señal batida se situaría entre 3 y 6 GHz, para evitar en la medida de lo posible confusiones con los batidos entre modos.

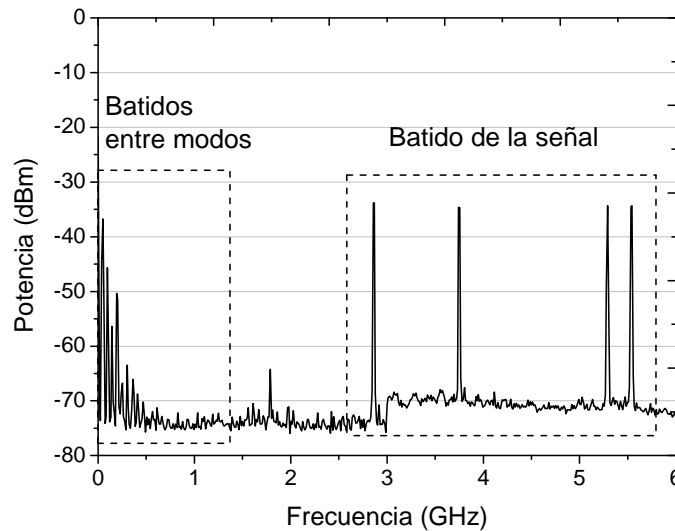


Figura 7.5. Traza del ESA con *max hold* activado durante 5 segundos.

En la figura anterior podemos ver un ejemplo en el ESA de la señal recibida cuando λ_1 (1538 nm) posee algo menos de potencia que λ_2 (1541 nm). Esta traza se ha tomado con la opción *max hold* activado durante 5 segundos. Es por eso que podemos apreciar los saltos realizados por la señal en este intervalo de tiempo en la parte derecha de la traza. Mediante una disminución del *span* y aumento de la resolución se comprobó que la señal era monomodo. Sin embargo, la presencia de batidos entre modos a baja frecuencia nos indica que la otra línea de emisión no es monomodo.

Durante estas pruebas iniciales se ha aprendido a interpretar las señales observadas en el ESA de manera que:

- Viendo un batido de una sola línea con una resolución de 1 MHz o menos podremos afirmar que la señal es monomodo.
- Si existen batidos entre modos a muy baja frecuencia (hasta 1 GHz) podemos afirmar que una de las dos líneas de emisión tiene comportamiento multimodo.

Con esta información y la opción *max hold* para representar los saltos frecuenciales de la señal, se realizó una batería de pruebas exhaustiva que permitió comprobar que pese al cambio de condiciones respecto al artículo original, el sistema se había replicado.

7.3. Batería de pruebas

El objetivo de esta batería de pruebas era comprobar que se había conseguido replicar el montaje del artículo. Para ello era necesario comprobar:

- Ante una situación de igualdad de potencia en ambas líneas de emisión, ambas tienen comportamiento monomodo.
- Sustituyendo una de las líneas de emisión por un láser sintonizable el efecto es similar.
- Se produce comportamiento monomodo independientemente de la separación de los FBG.

En las pruebas comprobamos si el sistema tiene respuesta monomodo para condiciones diferentes, desde la igualdad en potencia, la desigualdad pequeña y la ausencia de la línea de emisión no observada. De la misma manera se probó a variar la posición de los FBG, a intercambiarlos y a aumentar la potencia de ecualización de la prueba (P_{ec}). Para todas las pruebas la potencia del láser de bombeo en 980 nm utilizada fue de 125mW y la potencia del láser sintonizable utilizado para el batido 1mW.

7.3.1. Prueba 1: Láser sintonizable centrado en λ_2

En esta prueba se observó en el ESA la línea de emisión en λ_2 (1541.5 nm) mientras se varió la potencia de λ_1 (1538.5), manteniendo la potencia de λ_1 constante en $P_{ec} = -15\text{dBm}$.

- λ_2 fijo en la potencia de ecualización (P_{ec}) y λ_1 apagado: No es monomodo, aunque instantáneamente aparezca un solo modo.
- λ_2 fijo a P_{ec} y λ_1 fijo a 5 dB menos que la P_{ec} : Sí es monomodo.
- λ_2 y λ_1 ecualizados a P_{ec} : Sí es monomodo
- λ_2 fijo a P_{ec} y λ_1 con mayor potencia: Sí es monomodo, pero esporádicamente aparecen batidos entre modos lo que hace suponer que λ_1 es multimodo.

7.3.2. Prueba 2: Láser sintonizable centrado en λ_1

Al igual que en la prueba anterior en ésta se observó en el ESA la línea de emisión en λ_1 (1538.5) mientras se varió la potencia de λ_2 (1541.5 nm), manteniendo la potencia de λ_2 constante en $P_{ec} = -15\text{dBm}$.

- λ_1 fijo a P_{ec} y λ_2 apagado: Sí es monomodo. Contrariamente a lo esperado se observa operación monomodo.
- λ_1 fijo a P_{ec} y λ_2 fijo a 5 dB menos que la P_{ec} : No es monomodo, aunque ocasionalmente lo parezca no es constante.
- λ_2 y λ_1 fijos a P_{ec} : Sí es monomodo, aunque los saltos en frecuencia sean más frecuentes que en esta misma situación en la prueba 1.
- λ_1 fijo a P_{ec} y λ_2 con mayor potencia: Sí es monomodo.

Hay que tener en cuenta que para estas pruebas se utilizó una potencia de bombeo que es el umbral de emisión láser del anillo. Se pensó que puede ser por este motivo por el que en casi todos los casos observamos operación en monomodo, incluso cuando solamente tenemos una línea de emisión. Por tanto trataremos de aumentar la potencia para las siguientes pruebas.

7.3.3. Prueba 3: Láser sintonizable centrado en λ_2 aumentando la potencia de ecualización

Para esta prueba se aumentó la potencia de ecualización a $P_{ec} = -10$ dBm para comprobar si los resultados son dependientes de la potencia de las líneas de emisión.

- λ_2 fijo a P_{ec} y λ_1 apagado: No es monomodo.
- λ_2 fijo a P_{ec} y λ_1 fijo a 5 dB menos que la P_{ec} : Sí es monomodo, aunque ocasionalmente se excitan más modos, de manera que el comportamiento es dudoso.
- λ_2 y λ_1 fijos a P_{ec} : Sí es monomodo, con saltos en frecuencia especialmente amplios.
- λ_2 fijo a P_{ec} y λ_1 con mayor potencia que la P_{ec} : Sí es monomodo, se ven bastantes batidos entre modos a baja frecuencia que suponemos que son de λ_1 ya que es la línea de emisión con mayor potencia y por tanto, tendrá mayor número de modos con ganancia suficiente para ser excitados.

7.3.4. Prueba 4: Láser sintonizable centrado en λ_1 aumentando la potencia de ecualización

Prueba similar a la anterior en la que se aumentó la potencia de ecualización a $P_{ec} = -10$ dBm para comprobar si los resultados son dependientes de la potencia de las líneas de emisión.

- λ_1 fijo a P_{ec} y λ_2 apagado: No es monomodo.
- λ_1 fijo a P_{ec} y λ_2 fijo a 5 dB menos que la P_{ec} : No es monomodo.
- λ_1 y λ_2 fijos a P_{ec} : Sí es monomodo.
- λ_1 fijo a P_{ec} y λ_2 con mayor potencia que la P_{ec} : Sí es monomodo.

7.3.5. Prueba 5: Cambiar λ_2 por un FBG más cercano en longitud de onda (Láser sintonizable centrado en λ_1)

El objetivo de esta prueba fue estudiar la influencia en el sistema de la cercanía de ambas líneas de emisión entre sí. Para ello se substituyó λ_2 situado en 1541.5 nm por un FBG situado en 1539.8 nm. La potencia de ecualización se mantiene en -10 dBm.

- λ_1 fijo a P_{ec} y λ_2 apagado: No es monomodo.
- λ_1 fijo a P_{ec} y λ_2 fijo a 5 dB menos que la P_{ec} : No es monomodo.
- λ_1 y λ_2 fijos a P_{ec} : Sí es monomodo.
- λ_1 fijo a P_{ec} y λ_2 con mayor potencia que la P_{ec} : Sí es monomodo aunque con saltos frecuenciales mayores que en primer caso.

7.3.6. Prueba 6: Cambiar λ_2 por un FBG más cercano en longitud de onda (Láser sintonizable centrado en λ_2)

Prueba similar a la anterior, sólo que visualizando λ_2 en vez de λ_1 . La potencia de ecualización se mantiene en -10 dBm.

- λ_2 fijo a P_{ec} y λ_1 apagado: No es monomodo.
- λ_2 fijo a P_{ec} y λ_1 fijo a 5 dB menos que la P_{ec} : Sí es monomodo.
- λ_2 y λ_1 fijos a P_{ec} : Sí es monomodo.
- λ_2 fijo a P_{ec} y λ_1 con mayor potencia que la P_{ec} : Sí es monomodo.

7.3.7. Prueba 7: Sustituir FBG de λ_2 por el láser sintonizable en 1539.8nm (observamos λ_1)

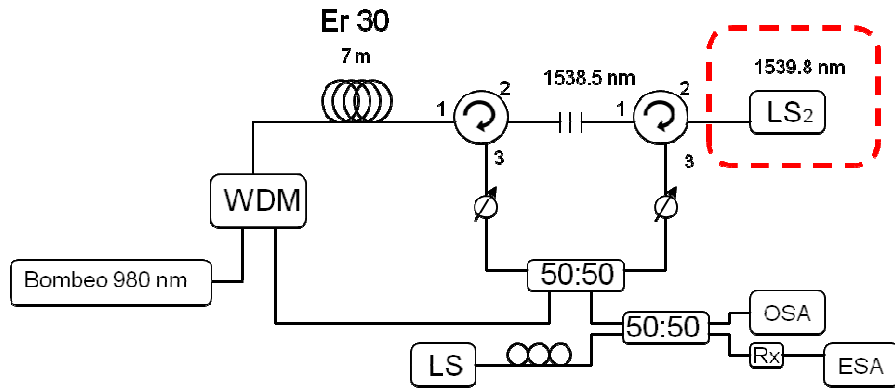


Figura 7.6. Variación del montaje sustituyendo el segundo FBG por un LS

En esta prueba se sustituyó el FBG de 1539.8nm por el láser sintonizable colocado en esa misma posición para comprobar su influencia. Observaremos λ_1 en 1538.5 nm.

- λ_1 fijo a P_{ec} y λ_2 apagado: No es monomodo.
- λ_1 fijo a P_{ec} y λ_2 fijo a 5 dB menos que la P_{ec} : No es monomodo, aunque ocasionalmente sí lo sea no es algo continuado.
- λ_1 y λ_2 fijos a P_{ec} : Sí es monomodo.
- λ_1 fijo a P_{ec} y λ_2 con mayor potencia que la P_{ec} : Sí es monomodo.

Era evidente el deterioro de la medida desconectando el LS de la segunda línea de emisión. Al tener una sola línea de emisión se observa comportamiento claramente multimodo, pero al conectar el LS, inmediatamente el número de modos se reduce llegando a operación monomodo si están “ecualizados”.

7.3.8. Prueba 8: Sustituir FBG de λ_2 por el láser sintonizable en 1552.5nm (observamos λ_1)

Esta prueba fue igual que la anterior salvo porque el láser sintonizable se colocó en 1552.5 nm y el primer FBG se ha sustituyó tal que $\lambda_1=1555$ nm. El motivo de estos cambios fue trabajar en una parte más alta de longitudes de onda porque es donde más ganancia proporciona la fibra dopada con Erblio. De esta manera se pudo aumentar la potencia de ecualización a -1.5 dBm.

- λ_1 fijo a P_{ec} y λ_2 apagado: No es monomodo.
- λ_1 fijo a P_{ec} y λ_2 fijo a 5 dB menos que la P_{ec} : No es monomodo

- λ_1 y λ_2 fijos a P_{ec} : No es monomodo
- λ_1 fijo a P_{ec} y λ_2 con mayor potencia que la P_{ec} : No es monomodo.

Es curioso observar que en esta prueba en ningún caso se ha obtenido operación monomodo, ni siquiera ecualizando ambas líneas de emisión. Esto hace pensar que este efecto no se produce para alta potencia.

7.4. Análisis de resultados y conclusiones

Tras la batería de pruebas queda el análisis para extraer conclusiones y comprobar si realmente los resultados obtenidos concuerdan con los mostrados por el artículo original. Para ello son tres los factores a considerar:

- Ante una situación de igualdad de potencia en ambas líneas de emisión, ambas tienen comportamiento monomodo.
- Sustituyendo una de las líneas de emisión por un láser sintonizable el efecto es similar.
- Se produce comportamiento monomodo independientemente de la separación de los FBG.

7.4.1. Igualdad de potencia en las líneas de emisión

En todas las pruebas realizadas salvo en la octava se ha comprobado que ambas líneas de emisión tienen comportamiento monomodo cuando las dos tienen la misma potencia. Sin embargo los resultados de la prueba ocho pese a ser negativos no nos influyen en la comparación con los resultados del artículo puesto que las condiciones son diferentes en nuestro caso, al tener mayor potencia de ecualización.

Por tanto podemos considerar que esta característica es similar en ambos montajes.

7.4.2. Sustitución de una línea de emisión por un láser sintonizable

De la misma manera se ha comprobado cómo la respuesta del sistema al sustituir la línea de emisión del segundo FBG por un láser sintonizable es similar al caso con el FBG, salvo en la prueba ocho, donde el resultado es negativo. De nuevo no tendremos en cuenta éste resultado para la comparación ya que la potencia de ecualización es muy diferente.

Por consiguiente consideramos que ésta afirmación también se cumple.

7.4.3. Independencia de la separación entre los FBG

En las pruebas 5 y 6 se han acercaron las líneas de emisión sustituyendo los FBG los otros más cercanos en longitud de onda. Aunque los resultados varíen ligeramente en condiciones de desigualdad en potencias, el hecho de que ante la igualdad exista comportamiento monomodo comprueba que la separación entre FBG no es relevante a la hora de conseguir este efecto.

7.4.4. Conclusiones

Hemos comprobado que cumplimos todas las características del sistema visto en el artículo [32], por lo tanto podemos afirmar que hemos replicado el sistema. Esta afirmación es importante ya que se ha tenido que sustituir el sistema del análisis original mediante el BOSA por otro mediante heterodinaje y detección en el ESA. Además se ha variado la longitud de onda del bombeo, así como las posiciones de los FBG. Sin embargo pese a estos cambios el sistema responde de la misma manera por lo que sabemos que la razón por la que ambas líneas operan monomodo al estar ecualizadas es independiente de estos factores.

También se ha visto cómo en determinadas condiciones una línea de emisión tenía comportamiento monomodo pese a no estar ecualizada en potencia con la otra. En la mayor parte de los casos la línea monomodo se correspondía con la señal que tiene menos potencia. Esto parece deberse a que al tener menos potencia el número de modos con energía suficiente para comenzar a emitir es menor.

Para comprobar esto se ha aumentó la potencia de ecualización en las pruebas 3 y 4. En teoría si nuestra suposición era cierta debería haber empeorado considerablemente la respuesta, incluso llegando ser multimodo pese a estar ecualizadas. Se aumentó unos 5 dBm la potencia de ecualización sin embargo la respuesta empeoró sólo ligeramente. Se pensó en aumentar más la potencia pero el bombeo estaba al máximo, por tanto se desestimó la idea hasta que se llegó a la octava prueba.

Una vez comprobado que la presencia del LS podía sustituir una línea de emisión se disponía de más margen de potencia ya que nos encontrábamos en la zona de máxima ganancia de la fibra dopada con Erblio. En la octava prueba se consiguieron ecualizar la línea y el LS a una potencia de -1.5 dBm frente a los -10dBm de las pruebas 3 y 4. En esta ocasión en ningún caso hubo comportamiento monomodo ni estando ecualizados.

Este hecho comprueba que el comportamiento monomodo es claramente dependiente de la potencia que tenga la línea de emisión. De esta manera cuanta más potencia posea más número de modos tienen la energía suficiente para alcanzar el umbral de emisión láser.

Sin embargo pese a tener clara esta implicación siguen existiendo dudas del porqué del efecto, ya que en una sola línea de emisión con una misma potencia se tiene comportamiento monomodo o no dependiendo de la presencia o no de la otra línea de emisión contigua.

Para seguir investigando las posibles causas se estudiarán en el siguiente capítulo diferentes tipos de montajes que descarten la influencia o no de determinados aspectos, como la topología, el tipo de amplificación, etc.

CAPÍTULO VIII

Nuevas topologías basadas en el láser en anillo de fibra dopada con Erblio para operación monomodo en doble longitud de onda

8.1. Introducción

En este capítulo el objetivo es estudiar diferentes topologías que puedan dar pistas o descartar hipótesis relacionadas con el funcionamiento del sistema láser en anillo con doble longitud de onda, seleccionadas mediante FBGs. En este montaje al equilibrar en potencia las dos líneas de emisión, el comportamiento de ambos es monomodo, mientras que si están sin “ecualizar” su comportamiento es multimodo.

Se ha demostrado que si las líneas emiten mucha potencia no ocurre esto, ya que la energía es suficiente como para que el comportamiento sea multimodo. Sin embargo, lo que es extraño es que ante la misma potencia una línea de emisión no tenga comportamiento monomodo sin la presencia de otra cercana equilibrada en potencia. Para estudiar el porqué de este efecto se realizarán variaciones del montaje original para descartar determinadas hipótesis, como por ejemplo, que se trate de un efecto asociado a la estructura o a alguna propiedad particular de la fibra dopada con Erblio de Liekki.

El material utilizado para la realización de las pruebas de este capítulo ha sido el siguiente:

- Analizador de espectros óptico (OSA) Advantest Q8384
- Analizador de espectros eléctrico (ESA) R&S FSP30 (1093.4495.30)
- Fotodetector NewFocus 1544B
- Amplificador de fibra dopada con Erblio (EDFA) Photonetics 3624-BT-13
- Láser de bombeo 980 nm Amonics ALD98-100-B-FA
- Láser de bombeo Raman IPG RLD-3K-1445
- Láser sintonizable Agilent 8164B
- Láser sintonizable Ando AQ8201-13
- Sección de 7 m de fibra dopada con Erblio 30 de Liekki.
- Redes de difracción Bragg centradas en 1555, 1541.5, 1538 y 1552.5 nm respectivamente y reflectividad del 99%.
- Circuladores de tres puertos.
- Multiplexor de longitud de onda (WDM) 980nm/1550nm
- Multiplexor de longitud de onda (WDM) 1445nm/1550nm
- Acopladores de 50:50 y 90:10
- Atenuadores variables
- Controlador de polarización.
- Gel adaptador de índice

- $\lambda_1 = 1542\text{nm}$; $\lambda_2 = 1550\text{nm}$; $P_{ec} = -14\text{ dBm}$ (de ambas líneas de emisión); $P_{EDFA} = 10\text{mW}$; Láser sintonizable en λ_2 : Sí es monomodo.

Se colocan ahora un FBG en 1555nm y otro en 1552.5 nm, aumentamos la potencia del bombeo del EDFA puesto que no alcanzamos la emisión con la anterior (probablemente debido a que uno de los FBG introduzca mayores pérdidas):

- $\lambda_1 = 1552.5\text{ nm}$; $\lambda_2 = 1555\text{nm}$; $P_{ec} = -12\text{ dBm}$ (de ambas líneas de emisión); $P_{EDFA} = 25\text{mW}$; Láser sintonizable en λ_1 : No es monomodo.
- $\lambda_1 = 1552.5\text{ nm}$; $\lambda_2 = 1555\text{nm}$; $P_{ec} = -12\text{ dBm}$ (de ambas líneas de emisión); $P_{EDFA} = 25\text{mW}$; Láser sintonizable en λ_2 : No es monomodo.

Para comprobar que los resultados no sean negativos por tener demasiada potencia de ecualización tratamos de ecualizarlos con el mínimo posible en el que se generan las líneas de emisión (-16dBm):

- $\lambda_1 = 1552.5\text{ nm}$; $\lambda_2 = 1555\text{nm}$; $P_{ec} = -16\text{ dBm}$ (de ambas líneas de emisión); $P_{EDFA} = 25\text{mW}$; Láser sintonizable en λ_1 : No es monomodo.
- $\lambda_1 = 1552.5\text{ nm}$; $\lambda_2 = 1555\text{nm}$; $P_{ec} = -16\text{ dBm}$ (de ambas líneas de emisión); $P_{EDFA} = 25\text{mW}$; Láser sintonizable en λ_2 : No es monomodo.

La conclusión de este montaje fue que en general aunque también alcanza operación en monomodo posee peor respuesta que el realizado con la fibra de Liekki y el bombeo a 980nm. El dato más curioso son las cuatro últimas pruebas donde no se ha conseguido operación monomodo en ningún caso, ni siquiera bajando la potencia de ecualización al mínimo posible. Quizás tenga que ver con el aumento de la potencia de bombeo, especialmente en el último caso, donde quizás disminuyendo la potencia de bombeo en vez de aumentar la atenuación el resultado hubiese sido diferente.

8.3. Montaje en paralelo

Para comprobar que el efecto que se produce no se debe a ningún efecto relacionado con la presencia de dos anillos que comparten parte del recorrido se realizaron varias variantes del montaje original. Una variante del montaje original estudiada es la realizada sustituyendo ambas ramas por un acoplador con los dos FBG colocados en paralelo.

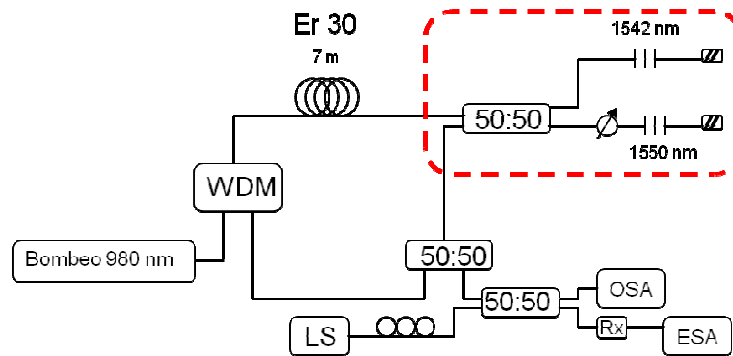


Figura 8.2. Modificación del montaje en paralelo

En las primeras pruebas realizadas resulta imposible la ecualización y en ningún caso se observa comportamiento monomodo. Una causa posible de este comportamiento es que exista *hole burning* en la cavidad. Para evitarlo se coloca un aislador entre la fibra dopada y el acoplador.

El problema que observamos ahora es que la potencia que llega a cada FBG es la mitad que en los montajes anteriores, debido al acoplador. En estas condiciones pese a aumentar el bombeo de 980nm al máximo es muy complicado alcanzar para ambas líneas de emisión simultáneamente el umbral de emisión láser, por tanto es imposible ecualizarlas. Para evitar esto se sustituye el acoplador 50/50 del que se extrae la señal por uno 90/10.

En estas condiciones se consiguieron ecualizar ambas líneas de emisión a -22 dBm (aunque hay que tener en cuenta que la señal extraída para la medida es 7 dB menor que en los casos anteriores, aunque la potencia que circule en el anillo sea parecida). Esta falta de potencia en recepción dificultó notablemente las medidas en el ESA, no pudiendo comprobarse o no el comportamiento monomodo.

8.4. Montaje en serie

Otra variante estudiada fue un montaje en serie donde se sustituye la segunda rama por una conexión en serie de los dos sensores FBG.

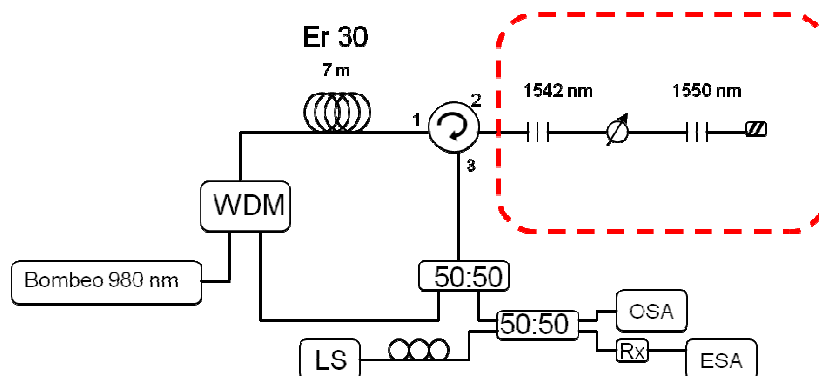


Figura 8.3. Modificación del montaje en serie

Los FBG utilizados estaban centrados en 1542 y 1550 nm, el láser sintonizable utilizado para el batido tenía una potencia de 1 mW y la potencia de bombeo era de 123mW. Las líneas de emisión se ecualizaron a -12 dBm.

El resultado obtenido fue positivo, es decir, al estar las dos líneas de emisión ecualizadas éstas eran monomodo. Sin embargo al eliminar una de las dos líneas de emisión, aún teniendo la misma potencia eran multimodo.

Por todo esto, aparentemente el efecto no se debe a ningún efecto provocado por la presencia de dos anillos en la estructura.

8.5. Sustitución por ganancia Raman

La última modificación del montaje realizada fue la sustitución en el montaje de la fibra dopada con Erblio y el bombeo de 980 nm por un rollo de fibra de fibra compensadora de dispersión (DCF) que generase ganancia Raman con la potencia de bombeo del láser Raman a 1445 nm. El objetivo de este montaje es comprobar que el efecto producido al ecualizarse las dos líneas de emisión se da sólo con la utilización de ganancia proporcionada con Erblio, no con la proporcionada con Raman.

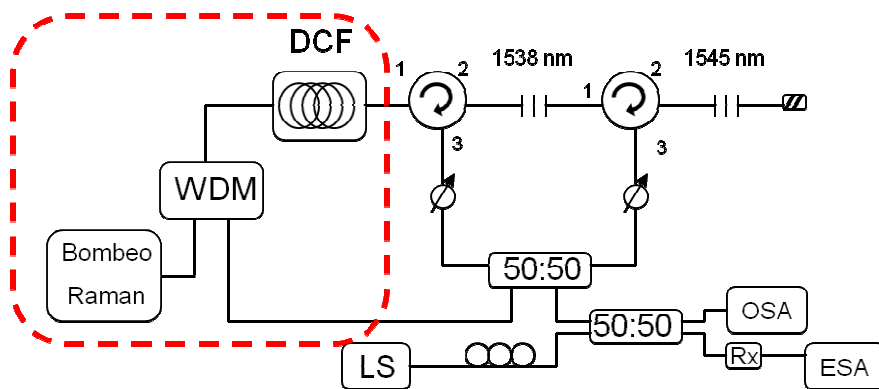


Figura 8.4. Modificación del montaje con ganancia Raman

Como era de esperar los resultados en este montaje son negativos, ya que la introducción de fibra compensadora como medio para generar la ganancia Raman aumenta mucho la longitud del anillo. Así el sistema pasa de tener un anillo de veinte metros a uno del orden de kilómetros. Esto supone que los modos se acerquen mucho entre sí, dificultando la detección o no monomodo.

En cualquier caso no es necesario comprobarlo ya que en cuanto las líneas de emisión generadas alcanzan el umbral de emisión láser la señal es claramente

multimodo independientemente de la ecualización. Es evidente ya que las líneas generadas son muy anchas, de toda la anchura del FBG, es decir, de 0.2 nm.

Por lo tanto es evidente que utilizando ganancia Raman el sistema no se comporta de la misma manera y no se observa comportamiento monomodo en ningún caso.

8.6. Conclusiones

En resumen, durante esta sección se ha replicado el montaje estudiado en el capítulo V. Ha sido necesaria la sustitución de algunos componentes, siendo especialmente complicada la sustitución del BOSA por el ESA junto con un láser sintonizable para el batido. Sin embargo finalmente en el capítulo VI se ha demostrado que el sistema responde de la misma manera.

También se ha mostrado que el hecho de que al igualar la potencia de las dos líneas de emisión ambas tienen comportamiento monomodo está relacionado con la potencia inyectada, ocurriendo el efecto sólo para los márgenes de potencia más bajos. Este comportamiento era de esperar ya que al aumentar la ganancia suministrada a las líneas aumenta la energía disponible en ambas, aumentando el número de modos con la energía necesaria para superar el umbral de emisión láser.

Finalmente en el capítulo VII se han estudiado diferentes topologías variantes del montaje original para comprobar si el efecto estudiado tenía alguna relación con la presencia de un doble anillo. De la misma manera se ha estudiado el montaje sustituyendo la fibra dopada y el bombeo de 980nm por un amplificador de fibra dopada con Erblio comercial (EDFA). Con esta prueba se pretendía ver si alguna característica de la fibra dopada con Erblio de Liekki podía estar afectando a la respuesta del sistema. Sin embargo aunque en ocasiones la respuesta era menos estable en general se cumplía, salvo para los casos donde la potencia inyectada por el EDFA era alta. Por último, se ha sustituido la ganancia del sistema por ganancia Raman para comprobar, como era de esperar, que el sistema no llegaba a operar en monomodo en estas condiciones.

En definitiva, aunque se han visto indicios del funcionamiento del efecto que provoca que dos líneas de emisión ecualizadas operen en monomodo, no se ha podido deducir su funcionamiento por completo. En cualquier caso la experiencia acumulada en la interpretación de este tipo de montajes ha ayudado en otros estudios como en adaptaciones del montaje en banda L para aplicaciones como la detección de gases (ver publicaciones en el Anexo).

Conclusiones del proyecto

Durante este proyecto, “Multiplexación de sensores remotos mediante estructuras láser de fibra óptica” se han estudiado dos partes con montajes y fines diferentes, aunque relacionados entre sí por estar basados en láseres de fibra.

La primera parte vista en la sección II trata del desarrollo de una nueva técnica de interrogación de sensores para larga distancia. El proceso se basa en un láser de fibra con amplificación Raman y una cavidad formada por un circulador a modo de espejo y los propios FBG. Sin embargo, el sistema no llega a actuar como un láser en sí mismo ya que no se le proporciona la suficiente ganancia para que se creen las líneas de emisión. Se trata de introducir un láser sintonizable en la cavidad y observar cómo su potencia aumenta al barrer la zona de los sensores. Se observó que las ondas de Stokes generadas por la dispersión Brillouin tenían mucha potencia, y que ésta a su vez aumentaba considerablemente al recorrer los FBG.

Por tanto, el estudio se centró en el desarrollo de una nueva técnica de medida que pudiese aprovechar estas características. Ésta se basó en la detección mediante heterodinaje de la propia señal del LS y la onda de Stokes generada. De esta manera el sistema se ecualizaba de forma que la primera onda de Stokes al no encontrarse sobre el sensor (retornaba con menos potencia) no alcanzase el umbral de emisión láser y sin embargo sí lo hiciera sobre el FBG. Así existía un gran aumento de potencia en la onda de Stokes, y aunque no fuese tan importante también existía aumento de la potencia que retornaba del LS. De esta forma el batido obtenido tras el fotodetector y situado en la frecuencia Brillouin (en torno a 11 GHz) variaba ampliamente al recorrerse el sensor.

Así se creó un sistema de interrogación para cuatro sensores situados a 100 km con una relación señal/ruido de unos 30 dB, la mayor conocida para sistemas de esta longitud. Además el sistema se ha comprobado como sensor de temperatura.

Al tratar de aumentar la distancia del sistema sensor se encontraron numerosos problemas debidos al perfil de ganancia Raman y a la recirculación de la señal. Tras un gran número de pruebas finalmente se consiguió mejorar el montaje hasta conseguir alcanzar dos sensores situados a 155 km con un margen sobre el ruido de 10 dB. Para conseguirlo se añadió una sección de fibra dopada con Erbio en el kilómetro 55 del montaje, aportando ganancia además de la Raman. También se añadió un *polarization scrambler* a la salida del LS y se introdujo en la cavidad un filtro sintonizable que se desplazaba solidariamente con el LS para evitar la recirculación de la mayor parte de longitudes de onda innecesarias. Además el montaje de 100 km utilizaba 700 mW de bombeo frente a los 600 mW utilizados por el montaje de 155km.

La segunda parte del proyecto vista en la sección III se ha centrado en el estudio y análisis de un láser multi-línea de fibra dopada con Erbio con configuración en anillo. En primer lugar se ha replicado un montaje visto y se ha comprobado su correcto

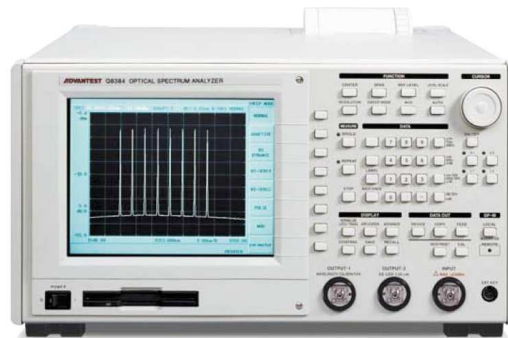
funcionamiento con el fin de o bien mejorarlo o bien descubrir por qué ocurre en el sistema que si ambas líneas de emisión poseen la misma potencia, pasan a ser monomodo.

Una vez que se confirmó la réplica se pasaron a estudiar diferentes variantes del sistema para comprobar su influencia en el efecto. Se comprobó como era de esperar que este efecto sólo ocurría para potencias medias/bajas de las líneas de emisión. También se demostró que el funcionamiento del montaje no dependía de la fibra dopada con Erblio de Liekki ya que también funcionaba con un amplificador de fibra dopada con Erblio comercial (EDFA). De la misma manera se comprobó que el efecto no era dependiente de algún efecto relacionado con la presencia de dos anillos en la cavidad y que no funciona utilizando amplificación Raman.

En definitiva, en la primera parte del proyecto se ha diseñado una nueva técnica de interrogación para larga distancia, alcanzándose cuatro sensores situados a 100 km, lo que ha sido recogido en el artículo *“Fiber Bragg Grating interrogation technique for remote sensing (100km) using a hybrid Brillouin-Raman fiber laser”* que está pendiente de aceptación en el *“21th International Conference on Optical Fibre Sensors”*. Sobre este montaje se consiguió una gran mejora alcanzándose 155 km con dos sensores, lo que ha supuesto la publicación *“Remote (155 km) fiber Bragg grating interrogation technique combining Raman, Brillouin and Erbium gain in a fiber laser”* que se encuentra pendiente de aceptación en el *“IEEE Photonic Technology Letters”*. En la segunda parte del proyecto no se ha conseguido ningún avance significativo en el montaje estudiado. Sin embargo aunque no completamente, se han comprendido los factores que influyen en la operación monomodo de las líneas de emisión. Este conocimiento junto a la experiencia obtenida en la interpretación de las señales procedentes del batido en el ESA han sido de utilidad en la adaptación del montaje a banda L con aplicación como sensor de gases. Esto se puede ver en el artículo *“L-Band Multiwavelength Erbium-Doped Fiber Ring Laser for Sensing Applications”* que también se encuentra pendiente de aceptación para el *“21th International Conference on Optical Fibre Sensors”*. Todos ellos pueden consultarse en el Anexo 2.

Material utilizado

Optical Spectrum Analyzer (OSA)



MARCA: ADVANTEST

MODELO: Q8384

ESPECIFICACIONES

Resolución de longitud de onda :	10pm o mayor
Rango dinámico:	60dB o más
Precisión de longitud de onda :	$\pm 0.05\text{nm}$
Rango de frecuencias:	48Hz a 66Hz

(Electrical) Spectrum Analyzer (ESA)



MARCA: ROHDE & SCHWARZ

MODELO: R&S FSP30 (1093.4495.30)

ESPECIFICACIONES

Resolución frecuencial (máx) :	0.01 Hz
Rango dinámico del detector RMS:	100dB
Precisión de la medida total :	$\pm 0.5\text{dB}$
Rango de frecuencias:	9 kHz a 30GHz
Ancho de banda de resolución (RBW)	10 Hz a 10 MHz

Láser sintonizable Agilent



MARCA: AGILENT

MODELO: 8164B

ESPECIFICACIONES

Rango:	1450-1590nm
Resolución:	0.1pm, 12.5 MHz a 1550 nm
Precisión en selección λ emisión:	1pm
BW espectral:	100kHz (control de coherencia OFF)
Pout_max:	-1dBm (bajo SSE); 7 dBm (alta pot)
RIN:	-145dB/Hz

Láser sintonizable Ando



El módulo láser AQ8201-13 se encuentra montado sobre una carcasa de tamaño medio AQ8203 también de ANDO.

MARCA: ANDO

MODELO: AQ8201-13

ESPECIFICACIONES

Rango:	1460-1580nm
Resolución:	10pm
Precisión en selección λ emisión:	$\pm 0.2\text{nm}$
BW espectral:	5MHz
Pout_max:	6dBm
RIN:	-145dB/Hz

Láser Raman



MARCA: IPG Fibertech

MODELO: RLD-3K-1445

ESPECIFICACIONES

Modo de operación:	CW
Polarización:	Aleatoria
Longitud de onda de emisión:	1445 nm
Potencia máxima:	3.2 W
Ancho espectral 3dB:	0.5 nm (min), 2.5 nm (máx)
Supresión de lóbulo lateral:	45dB

Láser de bombeo 980 nm



MARCA: Amonics
 MODELO: ALD98-100-B-FA

ESPECIFICACIONES

Modo de operación:	CW
Estabilidad en potencia (8h):	0.02 dB
Longitud de onda de emisión:	976 nm
Potencia máxima:	139 mW
FWHM (2.35σ):	0.616 nm

Amplificador de fibra dopada con Erblio (EDFA)



MARCA: PHOTONETICS
 MODELO: 3624-BT-13

ESPECIFICACIONES

Ganancia a pequeña señal (1530nm):	41 dBm
Ganancia a pequeña señal (1550nm):	29 dBm
Potencia de salida (-1 dBm IN a 1540nm):	14.4 nm
Factor de ruido:	< 5 dB
Dependencia de la polarización:	0.2 dB

Fotodetector



MARCA: NEW FOCUS

MODELO: 1544-B

ESPECIFICACIONES

Rango de longitud de onda:	400-1650 nm
Ancho de banda a -3dB:	DC a 12GHz
Tiempo de subida :	30 ps
Ganancia de conversión:	-200V/W
Respuesta típica:	0.2 A/W
Potencia de saturación	3 mW

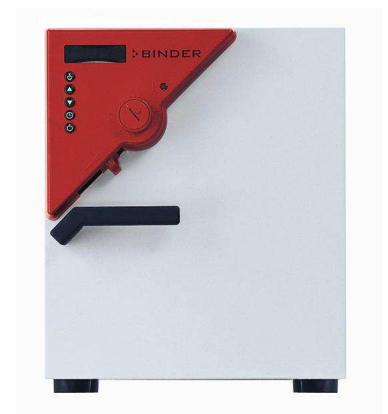
Cámara climática

MARCA: BINDER

MODELO: FD-23

ESPECIFICACIONES

Rango de temperatura:	300°C	
Variación de temperatura:	a 70°C	0.8°C
	a 150°C	2.2°C
	a 300°C	4.3°C
Fluctuación de la temperatura:	±0.3°C	



Tiempo de calentamiento:	hasta 70°C	7min
	hasta 150°C	22min
	hasta 300°C	45min

Polarization Controller

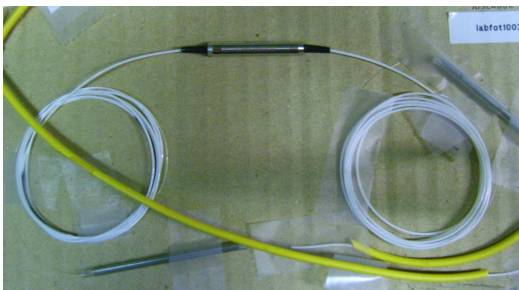
MARCA: NEWPORT
 MODELO: 2580P



ESPECIFICACIONES

Rango de longitud de onda:	1260-1630 nm
Pérdidas de inserción:	<0.05 dB
Pérdidas de retorno:	> 65 dB
Frecuencia de <i>scrambling</i> :	Hasta 6 kHz (aleatoria)
PDL:	<0.05 dB
PMD:	<0.1 ps

Aislador Raman



Este aislador, aunque no se ha incluido en los esquemas del montaje está situado siempre a la salida del láser Raman para evitar que por error una señal pueda regresar reflejada al láser, pudiendo dañarlo.

MARCA: OPNETI

ESPECIFICACIONES

Pérdidas de inserción de -5°C a 70°C:	0.5dB
Aislamiento a 23°C:	28dB
Max potencia óptica:	4W

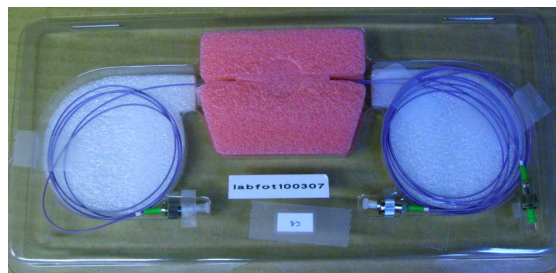
Circulador de tres puertos

MARCA LZX

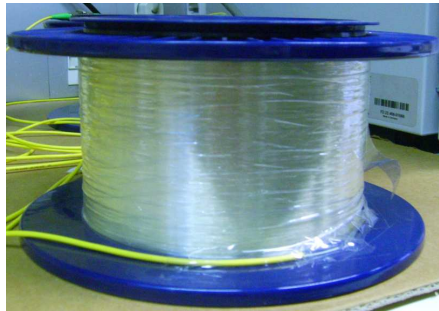
MODELO CR-3-145-P-09-1FC/APC

ESPECIFICACIONES

Pérdidas de inserción:	de 1 a 2	0.6dB
	de 2 a 3	0.61dB
Aislamiento:	de 2 a 1	57dB
	de 3 a 2	60dB



Fibra monomodo estándar



MARCA: TELNET

MODELO: SMF

ESPECIFICACIONES

Atenuación: 0.208dB/Km

Longitud: ± 1 m

Fibra compensadora de dispersión (DCF)



MARCA: TELNET

MODELO: Fibra SMF

ESPECIFICACIONES

Atenuación: 0.55dB/Km

Multiplexor en longitud de onda 1445/1550 (WDM)

MARCA: COMCORE

ESPECIFICACIONES	Puerto 1-Puerto 2	Puerto 1-Puerto 3
Pérdidas de inserción:	0.19dB	0.19dB
PDL:	<10	<10
Aislamiento:	18.91dB	24.19dB

Donde: Puerto 1: In
Puerto 2: 1445nm
Puerto 3: 1550nm

Multiplexor en longitud de onda 980/1550 (WDM)

MARCA: OPNETI

MODELO: FWDM-95-2-1-FA



ESPECIFICACIONES

Longitud de onda (canal 1550):	1520-1600 nm
Longitud de onda (canal 980):	965-1000 nm
Pérdidas de inserción (canal 1550):	0.45 dB
Pérdidas de inserción (canal 980):	0.6 dB
PDL:	<0.02 dB
Pérdidas de retorno:	> 60dB

Acopladores 90:10

MARCA: TELNET

MODELO: 2x2; 10:90

ESPECIFICACIONES

Pérdidas de inserción

Puerto 1:	PA (10%)	0.42dB
	PB (90%)	0.68dB
Puerto 2:	PB (10%)	0.71dB
	PA (90%)	0.63dB
Estabilidad con la polarización		<0.2dB
Directividad:		>55dB

Acopladores 50:50

MARCA: TELNET

MODELO: WIC 2x2

ESPECIFICACIONES

Pérdidas de inserción

Puerto 1:	PA (50%)	3.56dB
	PB (50%)	3.57dB
Puerto 2:	PB (50%)	3.67dB
	PA (50%)	3.33dB
Estabilidad con la polarización		<0.15dB
Directividad:		>55dB

Acopladores 95:5

MARCA: TELNET

MODELO: WIC 2x2

ESPECIFICACIONES

Pérdidas de inserción

Puerto 1:	PA (5%)	14.53dB
	PB (95%)	0.54dB
Puerto 2:	PB (5%)	14.77dB
	PA (95%)	0.71dB
Estabilidad con la polarización		<0.15dB
Directividad:		>55dB



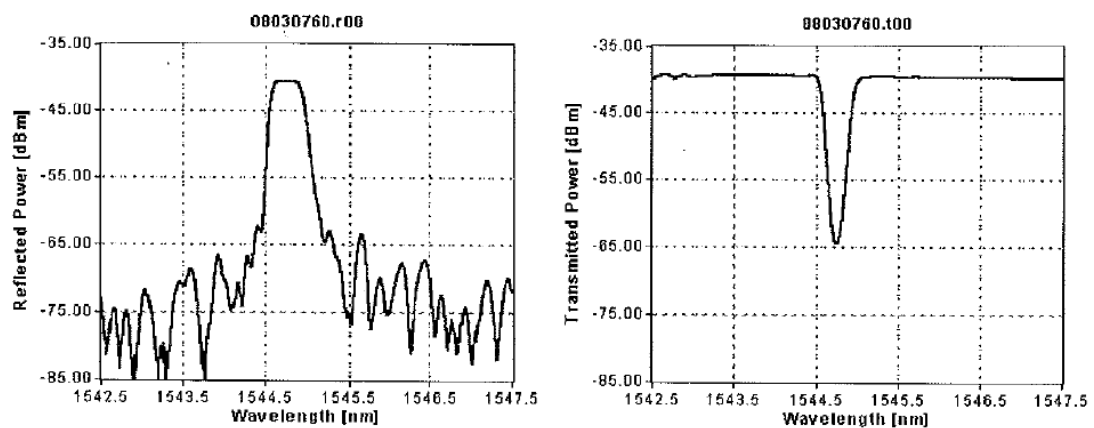
Red de difracción Bragg sintonizable



FBG Data Sheet

Company:	Advanced Optics Solutions (AOS) GmbH	Date:	16.03.07
Address:	Ammonstr. 35 01067 Dresden, Germany	Time:	16:36:37
Phone:	+49 (0)351 4960 193	SerNo:	08030760
Fax:	+49 (0)351 4960 194	Customer:	428
E-mail:	info@aos-fiber.com	Order-No:	Uni Navarra P-3
Web:	www.aos-fiber.com	Operator:	Grosse

OSA traces:



Measured Parameters:

Reflection Bandwidth	[nm]	[GHz]	Center Wavelength [nm]:	1544.758
			Center Freq [THz]:	194.1
			Transmission Loss [dB]:	25.3
-1.0 dB	0.325	40.8	Reflectivity [%]:	99.7
-3.0 dB	0.390	48.9	SNR @+/-1nm [dB]:	26.9
-20 dB	0.664	83.5		

Fibra fuertemente dopada con Erblio (Liekki Er80)

nLIGHT
HIGH-POWER SEMICONDUCTOR LASERS AND FIBERS

LIEKKI™ Er80-x/125

Large Mode Area Erbium Doped Fiber



LIEKKI™ Er80-4/125 and Er80-8/125 fibers are very highly doped large mode area erbium fibers suitable for medium-power amplifiers and lasers.

Good spliceability, high doping and a large core make these fibers ideal for medium peak power pulse amplification in the eye-safe 1.5 μm wavelength region. High erbium concentration reduces required application fiber length considerably while providing strong gain and reduced non-linear effects.

LIEKKI™ Er80-8/125 fibers can be used also with 980 nm pumps.

Applications

- Short pulse amplifiers
- Medium power low non-linearity applications
- LIDAR
- Medical
- Sensing

Features

- Excellent batch consistency of erbium peak absorption and spectral shape
- Ideal for pulse amplification in 1550 nm range
- Very short fiber lengths (typically less than 2 m) reduces non-linear effects like FWM, SRS and SBS
- Very good temperature behavior
- Low splice loss, LIEKKI™ EasySplice software for splicing parameters
- Suitable for both 980 nm and 1480 nm pumping
- Dual layer UV-cured acrylate coating

Typical device specification

		LIEKKI™ Er80-4/125	LIEKKI™ Er80-8/125
Optical			
Mode field diameter at 1550 nm	μm	6.5 ± 0.5	9.5 ± 0.8
Peak core absorption at 1530 nm	dB/m	80 ± 8	80 ± 8
Core numerical aperture (nominal)		0.2	0.13
Cut-off wavelength	nm	800 - 980	1100 - 1400
Geometrical and mechanical			
Core concentricity error	μm	< 0.7	< 0.7
Cladding diameter	μm	125 ± 2	125 ± 2
Cladding geometry		Round	Round
Coating diameter	μm	245 ± 15	245 ± 15
Coating material		High index acrylate	High index acrylate
Proof test	%	> 1	> 1


Custom configurations also available.

Notice

nLIGHT continually improves its products to provide its customers with outstanding quality and reliability. nLIGHT may make changes to specifications and product descriptions at any time, without notice. In addition, nLIGHT offers a limited warranty to ensure customer satisfaction. For complete details, please contact your nLIGHT sales representative.

Fibra fuertemente dopada con Erblio (Liekki Er30)

Er30-4/125 Er30-4/125HC Erbium Doped Fiber



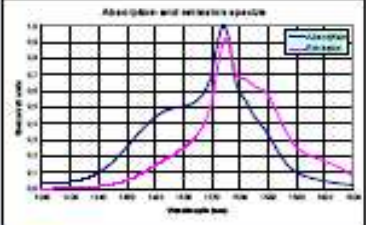
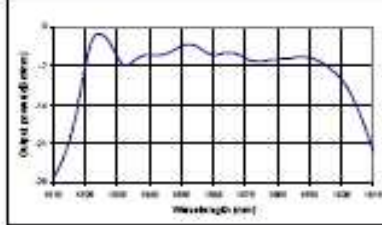
The Nanoparticle Fiber Company

Liekki DND technology
Liekki uses its proprietary Direct Nanoparticle Deposition (DND) technology and long term experience of conventional fiber manufacturing technologies to provide customers with high-quality state-of-the-art fibers. Highly-doped Liekki fibers minimize required application fiber length, provide strong amplification, high efficiency, broad and flat gain profile, excellent beam quality, and reduced nonlinear effects.

Product description
Liekki Er30-4/125 is a highly doped erbium fiber designed for C- and L-band amplifiers and ASE sources. This fiber is available in two versions: low cut-off and high cut-off. The high cut-off version has demonstrated the highest power conversion efficiency available in L-band: better than 50% for a typical fiber length of 20m.

Applications	Features and benefits
<ul style="list-style-type: none"> C- and L-band DWDM, Metro and CATV ASE sources 	<ul style="list-style-type: none"> Excellent batch consistency of erbium peak absorption and spectral shape Very short fiber lengths reduces non-linear effects like FWM, SRS and SBS Wide and flat spectrum Low polarization mode dispersion, typical value <25fs/m Low splice loss, Liekki EasySplice program for splicing parameters Telcordia GR-1312-CORE Generic Requirements qualified Dual layer UV-cured acrylate coating

Specifications		
	Value	Unit
Optical		
Mode field diameter at 1550nm	6.5 ± 0.5	µm
Peak core absorption at 1530nm	30 ± 3	dB/m
Core numerical aperture (nominal)	(0.2)	
Cut-off wavelength	800-980	nm
high cut-off (-HC) option	1000-1400	nm
Geometrical and mechanical		
Core concentricity error	< 0.7	µm
Cladding diameter	125 ± 2	µm
Cladding geometry	round	
Coating diameter	245 ± 15	µm
Coating material	high index acrylate	
Proof test	> 1	%

Performance data	
<p>Absorption and emission spectra</p> 	<p>C+L-band ASE source with Er30</p> 

ISO9001:2000 certified 06/2005/MS0

Specifications subject to change without notice.

Address Sorrionrinne 9, 08500 LOHJA FINLAND	Phone +358 19 357 391	Fax +358 19 357 3949	Email liekki@liekki.com	Website www.liekki.com
---	---------------------------------	--------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------

Estudio económico

Introducción

En este estudio económico se realiza una estimación del presupuesto del conjunto del Proyecto Fin de Carrera siendo considerado como un proyecto de investigación en una empresa. En él se tienen en cuenta el coste del personal encargado de realizarlo y el coste del material, instrumental y equipos de laboratorio empleados.

Coste de personal

Supondremos que el proyecto es realizado por un futuro ingeniero en telecomunicación, asesorado por un responsable cualificado, el cual dedica un 20% del tiempo de su trabajo a las tareas de asesoramiento y revisión.

Puesto	Sueldo (€/mes)	Cantidad	TOTAL (€)
Ing. de Telecomunicación	1500	6	9.000
Asesor Doctor	600	6	3.600

Al sueldo base de ambos se les debe añadir las gratificaciones así como las obligaciones sociales.

Cargas sociales	Porcentaje (%)
Indemnización por despido	3
Seguro de accidente	5
Subsidio familiar	3
Subsidio vejez	5
Abono festivos	10
Días de enfermedad	3
Plus cargas familiares	3
Gratificación extraordinaria	10
Otros conceptos	12
TOTAL	54

Por tanto, si a los sueldos anteriores le sumamos las cargas sociales obtendremos el salario total bruto.

Puesto	Salario base (€)	Cargas sociales	TOTAL (€)
Ing. de Telecomunicación	9.000	4.860	13.860
Asesor Doctor	6.000	3.240	9.240
			23.100

Coste material

En este apartado se incluye el coste de materiales adquiridos en alquiler y compra de equipos de laboratorio, el material fungible y la edición del proyecto.

Material alquilado

Parte del material utilizado en el estudio posee un coste muy alto para su utilización en un solo proyecto, por tanto se opta por alquilarlo. A continuación se detalla todo el material alquilado.

Equipo	Coste (€/mes)	Cantidad	TOTAL (€)
OSA Advantest Q8384	278	6	1.668
ESA R&S FSP30	380	6	2.280
Láser Sinto. Agilent 8164B	555	6	3.330
Láser Sinto. ANDO AQ8201	140	2	280
Láser Raman IPG RLD-3-1445	280	4	1.120
Láser bombeo ALD98-100	138	2	276
EDFA Photonetics 3624BT	270	3	810
Fotodetector New Focus 1444B	90	6	540
Cámara climática Binder FD23	83	2	166
P. Controller Newport 2580P	100	2	200
Carrete 50 km SMF	100	2x4=8	800
Carrete 25 km SMF	70	2x4=8	560
Carrete 5 km SMF	30	1x4=4	120
			12.150

Material adquirido

Este es el en detalle el material adquirido.

Equipo	Coste (€)	Cantidad	TOTAL (€)
Aislador Raman OPNETI	1500	1	1.500
Circulador LZX CR-3-145	480	2	960
DCF Telnet	2000	1	2.000
WDM 1445/1550 Comcore	45	1	45
WDM 980/1550 OPNETI	30	1	30
Acopladores 90:10 Telnet	30	1	30
Acopladores 95:5 Telnet	30	2	60

Acopladores 50:50 Telnet	30	2	60
FBG sintonizable AOS	205	1	205
FBG AOS	115	7	805
7m Fibra Liekki Er30	0	1	0
5m Fibra Liekki Er80	0	1	0
Control de polarización	170	1	170
Atenuador variable	100	2	200
			6.065

Coste total

Los costes calculados anteriormente forman parte del presupuesto de ejecución y material, sobre el que se calcula el beneficio industrial, y al cual se le aplica el IVA.

Coste de personal	23.100 €
Material alquilado	12.150 €
Material adquirido	6.065 €
Presupuesto de ejecución	41.315 €
Beneficio industrial (10%)	4.132 €
Presupuesto sin IVA	45.447 €
IVA (18%)	8.181 €
TOTAL	53.628 €

Por tanto el coste final del proyecto asciende a cincuenta y tres mil seiscientos veintiocho euros.

Bibliografía

Sección II

- [1] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam and E. J. Friebele, "Fiber grating sensors," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, pp. 1442-1462, 1997.
- [2] Y. -. Han, T. V. A. Tran, S. -. Kim and S. B. Lep, "Development of a multiwavelength Raman fiber laser based on phase-shifted fiber Bragg gratings for long-distance remote-sensing applications," *Opt. Lett.*, vol. 30, pp. 1114-1116, 2005.
- [3] J. M. Lopez-Higuera, *Hand Book of Optical Fibre Sensing Technology*. 2002.
- [4] A. D. Kersey, T. A. Berkoff and W. W. Morey, "Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter," *Opt. Lett.*, vol. 18, pp. 1370-1372, 1993.
- [5] M. Song, S. Yin and P. B. Ruffin, "Fiber Bragg grating strain sensor demodulation with quadrature sampling of a Mach-Zehnder interferometer," *Appl. Opt.*, vol. 39, pp. 1106-1111, 2000.
- [6] Q. Wu, Y. Semenova, A. Sun, P. Wang and G. Farrell, "High resolution temperature insensitive interrogation technique for FBG sensors," *Opt. Laser Technol.*, vol. 42, pp. 653-656, 2010.
- [7] R. W. Fallon, L. Zhang, A. Gloag and I. Bennion, "Identical broadband chirped grating interrogation technique for temperature and strain sensing," *Electron. Lett.*, vol. 33, pp. 705-707, 1997.
- [8] P. -. Peng, H. -. Tseng and S. Chi, "Long-Distance FBG Sensor System Using a Linear-Cavity Fiber Raman Laser Scheme," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, pp. 575-577, 2004.
- [9] G. A. Ball, W. W. Morey and P. K. Cheo, "Single- and multipoint fiber-laser sensors," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 5, pp. 267-270, 1993.
- [10] L. Talaverano, S. Abad, S. Jarabo and M. López-Amo, "Multiwavelength fiber laser sources with Bragg-grating sensor multiplexing capability," *J. Lightwave Technol.*, vol. 19, pp. 553-558, 2001.
- [11] J. H. Lee, J. Kim, Y. -. Han, S. -. Kim and S. B. Lee, "Investigation of Raman fiber laser temperature probe based on fiber Bragg gratings for long-distance remote sensing applications," *Optics Express*, vol. 12, pp. 1747-1752, 2004.
- [12] M. Fernandez-Vallejo, S. Díaz, R. A. Perez-Herrera, D. Passaro, S. Selleri, M. A. Quintela, J. M. López Higuera and M. Lopez-Amo, "Resilient long-distance sensor system using a multiwavelength raman laser," in 2009, .

- [13] Y. Dai, Y. Liu, J. Leng, G. Deng and A. Asundi, "A novel time-division multiplexing fiber Bragg grating sensor interrogator for structural health monitoring," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 47, pp. 1028-1033, 2009.
- [14] S. Kim, J. Kwon, S. Kim and B. Lee, "Multiplexed strain sensor using fiber grating-tuned fiber laser with a semiconductor optical amplifier," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 13, pp. 350-351, 2001.
- [15] C. Daru, S. Chester and H. Sailing, "Multiple fiber Bragg grating interrogation based on a spectrum-limited Fourier domain mode-locking fiber laser," *Opt. Lett.*, vol. 33, pp. 1395-1397, 2008.
- [16] P. -. Peng, K. -. Feng, W. -. Peng, H. -. Chiou, C. -. Chang and S. Chi, "Long-distance fiber grating sensor system using a fiber ring laser with EDWA and SOA," *Opt. Commun.*, vol. 252, pp. 127-131, 2005.
- [17] Y. -. Han, T. V. A. Tran, S. -. Kim and S. B. Lee, "Multiwavelength Raman-fiber-laser-based long-distance remote sensor for simultaneous measurement of strain and temperature," *Opt. Lett.*, vol. 30, pp. 1282-1284, 2005.
- [18] J. H. Lee, Y. M. Chang, Y. -. Han, H. Chung, S. H. Kim and S. B. Lee, "Raman amplifier-based long-distance remote, strain and temperature sensing system using an erbium-doped fiber and a fiber Bragg grating," *Optics Express*, vol. 12, pp. 3515-3520, 2004.
- [19] T. Saitoh, K. Nakamura, Y. Takahashi, H. Iida, Y. Iki and K. Miyagi, "Ultra-long-distance fiber Bragg grating sensor system," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 19, pp. 1616-1618, 2007.
- [20] Y. -. Rao, S. Feng, Q. Jiang and Z. -. Ran, "Ultra-long distance (300km) fiber bragg grating sensor system using hybrid EDF and raman amplification," in 2009, .
- [21] M. Sagues, R. G. Oleína, A. Loayssa, S. Sales and J. Capmany, "Multi-tap complex-coefficient incoherent microwave photonic filters based on optical single-sideband modulation and narrow band optical filtering," *Optics Express*, vol. 16, pp. 295-303, 2008.
- [22] M. Fernandez-Vallejo, R. A. Perez-Herrera, C. Elosúa, C. Barriain and M. Lopez-Amo, "Stable multiwavelength fiber laser for referencing intensity sensor networks using multiple amplified ring resonators," in 2010, .
- [23] J. Hu, Z. Chen, X. Yang, J. Ng and C. Yu, "100-km long distance fiber bragg grating sensor system based on erbium-doped fiber and raman amplification," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, pp. 1422-1424, 2010.
- [24] S. Martin-Lopez, M. Alcon-Camas, F. Rodriguez, P. Corredra, J. D. Ania-Castañon, L. Thévenaz and M. Gonzalez-Herraez, "Brillouin optical time-domain analysis assisted by second-order Raman amplification," *Optics Express*, vol. 18, pp. 18769-18778, 2010.

Sección III

- [25] A. Bellemare, "Continuous-wave silica-based erbium-doped fibre lasers," *Progress in Quantum Electronics*, vol. 27, pp. 211-266, 2003.
- [26] T. Miyazaki, N. Edagawa, S. Yamamoto and S. Akiba, "A multiwavelength fiber ring-laser employing a pair of silica-based arrayed-waveguide-gratings," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 9, pp. 910-912, 1997.
- [27] A. D. Kersey and W. W. Morey, "Multi-element Bragg-grating based fiber-laser strain sensor," *Electron. Lett.*, vol. 29, pp. 964-966, 1993.
- [28] E. Achaerandio, S. Jarabo, S. Abad and M. López-Amo, "New WDM amplified network for optical sensor multiplexing," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, pp. 1644-1646, 1999.
- [29] S. Pan, Z. Xiaofan and L. Caiyun, "Switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser incorporating a semiconductor optical amplifier," *Opt. Lett.*, vol. 33, pp. 764-766, 2008.
- [30] K. Zhang and J. U. Kang, "C-band wavelength-swept single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser," *Optics Express*, vol. 16, pp. 14173-14179, 2008.
- [31] J. L. Zhou, L. Xia, X. P. Cheng, X. P. Dong and P. Shum, "Photonic generation of tunable microwave signals by beating a dual-wavelength single longitudinal mode fiber ring laser," *Appl. Phy. B*, vol. 91, pp. 99-103, 2008.
- [32] M. A. Quintela, R. A. Perez-Herrera, I. Canales, M. Fernández-Vallejo, M. Lopez-Amo and J. M. López-Higuera, "Stabilization of dual-wavelength erbium-doped fiber ring lasers by single-mode operation," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, pp. 368-370, 2010.
- [33] L. Talaverano, S. Abad, S. Jarabo and M. López-Amo, "Multiwavelength fiber laser sources with Bragg-grating sensor multiplexing capability," *J. Lightwave Technol.*, vol. 19, pp. 553-558, 2001.
- [34] R. A. Pérez-Herrera, M. A. Quintela, M. Fernández-Vallejo, A. Quintela, M. López-Amo and J. M. López-Higuera, "Stability comparison of two ring resonator structures for multiwavelength fiber lasers using highly doped er-fibers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 27, pp. 2563-2569, 2009.

ANEXO 1

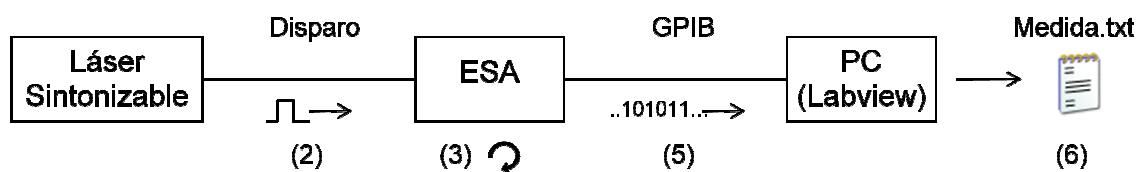
Software de medida en Labview

En este anexo se explica de manera breve el funcionamiento del programa diseñado en Labview para el sistema de medida visto en la sección II. Labview es una herramienta gráfica para pruebas, control y diseño mediante la programación en lenguaje gráfico.

En nuestro caso el programa se utiliza para crear una traza en función de un dato obtenido a cada paso del láser sintonizable en su barrido. Es decir, a cada paso que da el láser sintonizable el programa recoge una medida del ESA y la añade a una tabla junto con la longitud de onda asociada a ese dato. Al finalizar el programa éste guarda un archivo con todos los datos y sus longitudes ordenados en una tabla. El programa asimismo se encargará de configurar el ESA de la manera necesaria para la media.

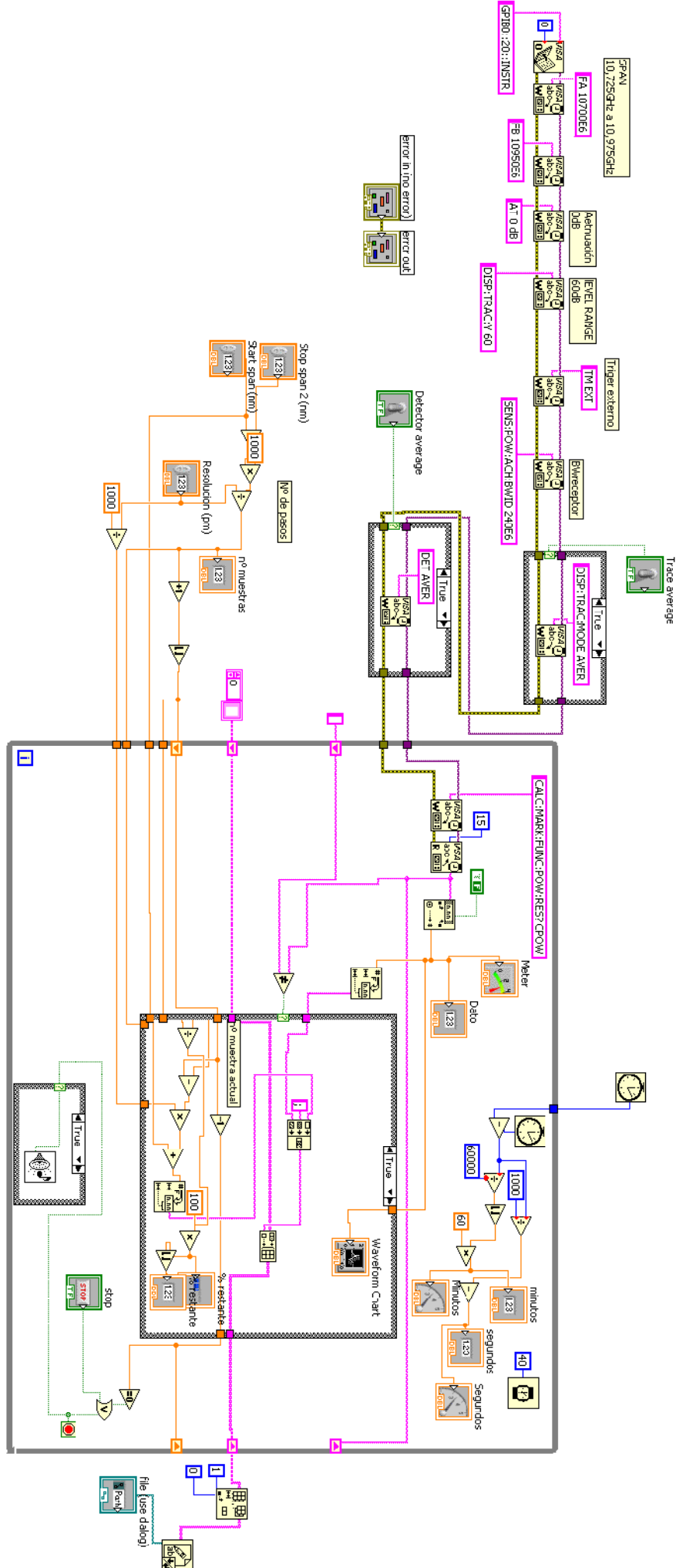
El proceso para la realización a grandes rasgos es el siguiente:

7. Inicio del barrido del láser sintonizable en la zona de trabajo.
8. A cada paso del barrido, el LS envía una señal de disparo al ESA.
9. El ESA realiza un refresco de la señal de entrada con cada señal de disparo (tarda en refrescar 20ms).
10. A cada refresco el ESA realiza la integración de la potencia en la zona de trabajo para el ancho de banda seleccionado
11. Mediante GPIB, el software de Labview recibe el valor de la potencia solicitada al ESA a cada paso con la longitud de onda correspondiente.
12. Al finalizar el barrido, el programa genera un archivo de texto con los datos obtenidos.



Para tratar de explicar el programa de manera más sencilla lo dividiremos en tres partes:

1. Configuración del ESA y cálculos previos
2. Toma de la medida
3. Generación del archivo de resultados

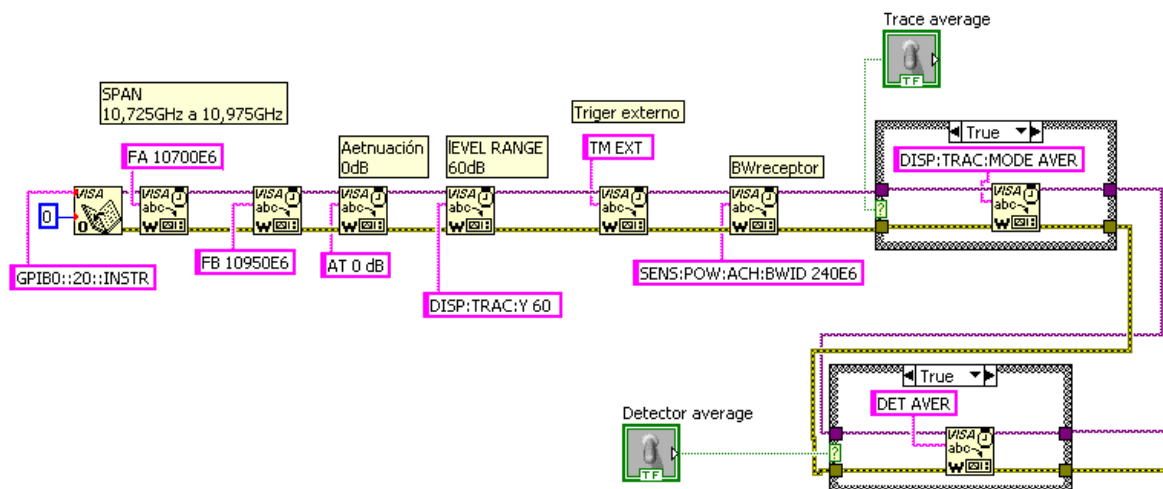


1. Configuración del ESA y cálculos previos

Esta primera parte a su vez puede dividirse en dos sub-apartados.

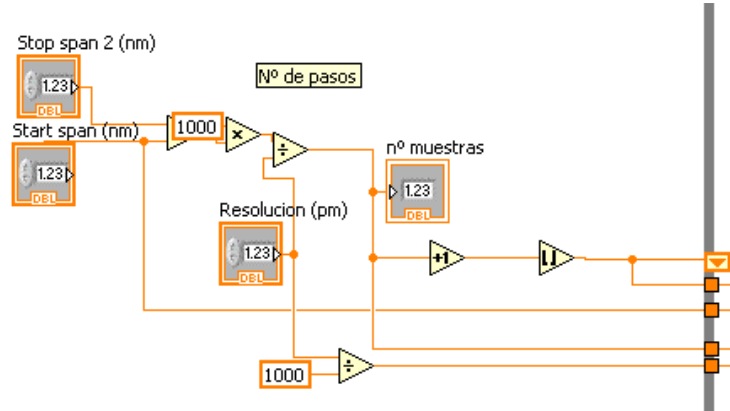
En el primero se configura el ESA para realizar la medida. Esto se realiza de manera secuencial en el siguiente orden:

1. Se establece la conexión del programa con el ESA.
2. Se limitan las frecuencias del *span*: FA para la frecuencia inicial y FB para la final.
3. Se coloca la atenuación del receptor en 0 dB
4. Se establece el rango de amplitud de visualización en 60dB
5. Se activa el sistema de *trigger* externo. De esta manera el ESA sólo realiza la medida al recibir una señal de disparo.
6. Se coloca el ancho de banda del canal a integrar.
7. Se activa la opción TRACE AVERAGE si está a su vez activada (TRUE) en el panel de control. En caso de estar desactivada no ha cambios.
8. Se activa la opción DETECTOR AVERAGE si está a su vez activada (TRUE) en el panel de control. En caso de estar desactivada no ha cambios.



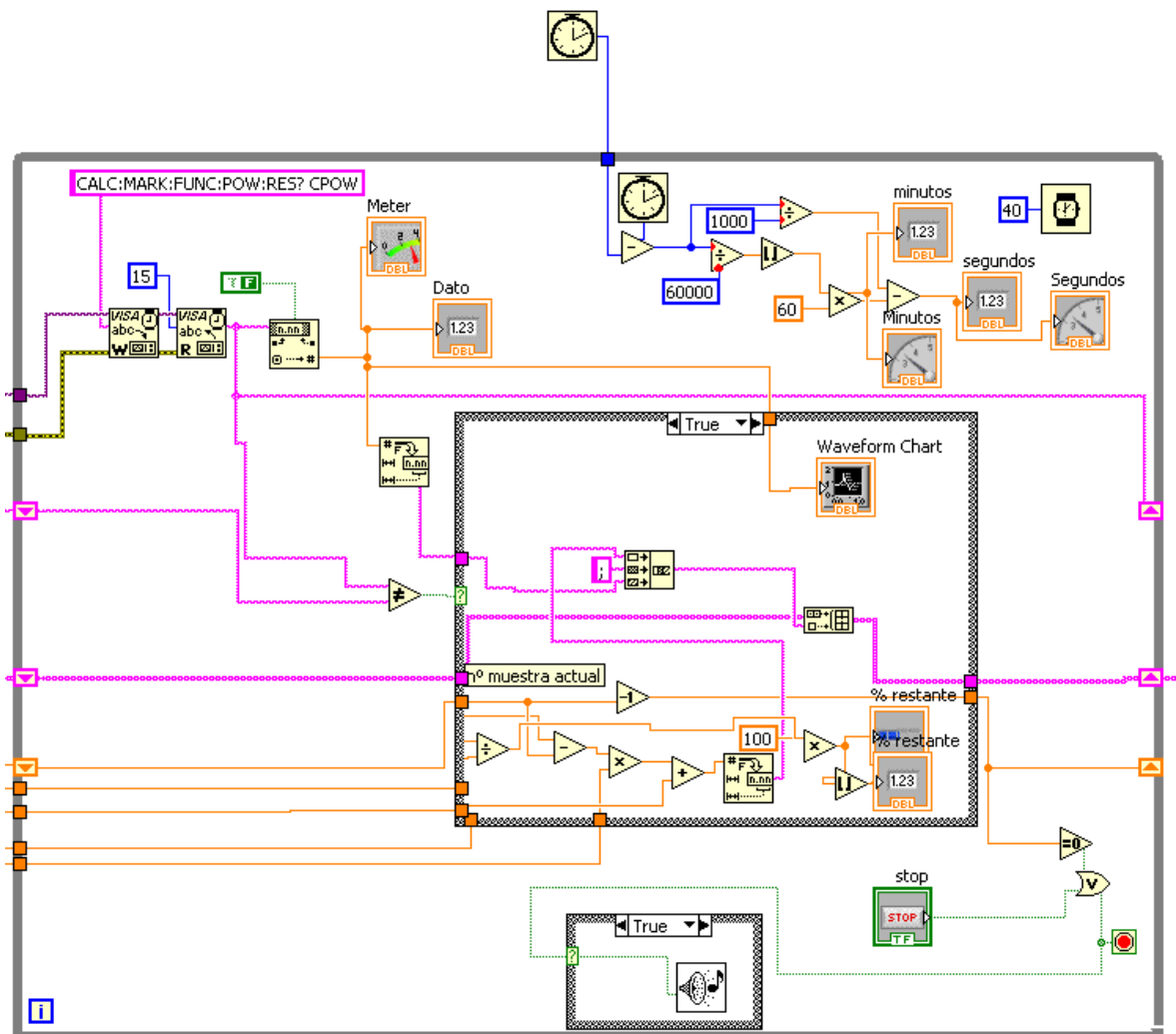
En la segunda parte de esta sección se realizan los cálculos previos de varias variables que se introducen en el bucle de la recogida de muestras:

- Número de muestras: Se calcula el número de datos que va a tener la tabla y se muestra en un indicador en el panel de control. Este valor se introduce en el bucle inicializando el valor que se suma a la longitud de onda inicial en cada paso para obtener la longitud de onda de cada muestra. Se calcula dividiendo la longitud de onda inicial menos la final entre la resolución.
- También se introduce en el bucle los datos de longitud de onda inicial y resolución en nanómetros, que son variables introducidos en el panel del control.

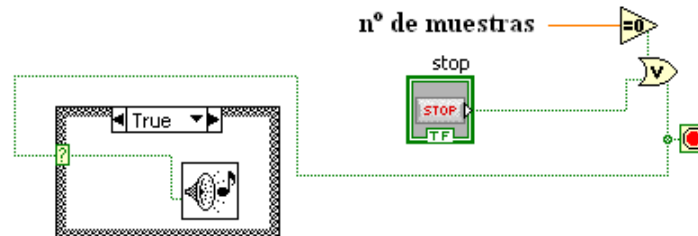


2. Toma de la medida

Es el cuerpo del programa, el bucle donde se recogen las muestras a cada paso del láser sintonizable hasta que este termina el barrido. A continuación podemos ver el bloque del bucle completo.

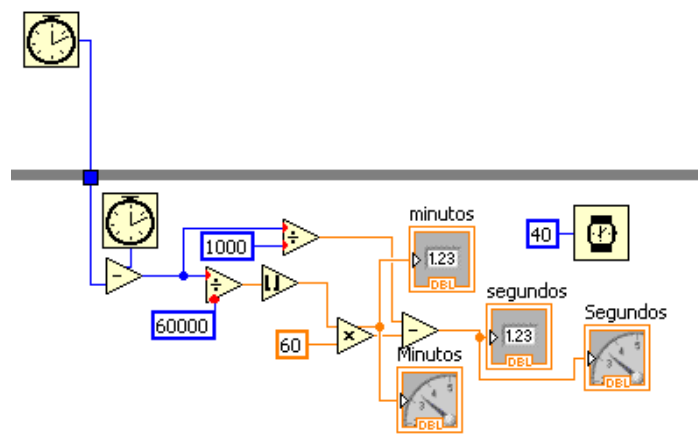


Está formado por un bucle “mientras” que finaliza al pulsar el botón de stop del panel de control o al llegar a la última muestra del número de muestras calculado anteriormente. A cada dato nuevo que se recoge las muestras restantes disminuyen en una, hasta llegar a cero. En ese momento el bucle finaliza emitiendo un sonido de aviso. Esta sub-parte podemos verla a continuación.



El bucle se repite cada 40 ms. Esto es así ya que el ESA tarda en integrar el canal y obtener el dato 20 ms y si el tiempo entre cada iteración fuese menor la comunicación mediante GPIB se saturaría resultando un error de E/S. Además recordemos que cada paso del LS se realiza cada 200 o 300 ms. Esto es así ya que el LS tarda unos 100 ms en dar cada paso y se detiene 100 o 200 ms en cada uno (dependiendo de la configuración del *dweel time*). Por tanto por cada paso que realiza el LS el bucle realiza más de 5 iteraciones.

También se incluye en el programa un reloj con minuterero y segundero que indica el tiempo que lleva realizándose el barrido en total. Para su realización se obtiene el valor en milisegundos del reloj interno del PC al iniciarse el programa. En cada iteración se vuelve a obtener ese valor al que se le resta el obtenido inicialmente, resultando el tiempo en milisegundos que lleva el programa en ejecución. Ese valor se transforma en minutos y segundos y se representan en sendos indicadores. Podemos ver esta parte a continuación.

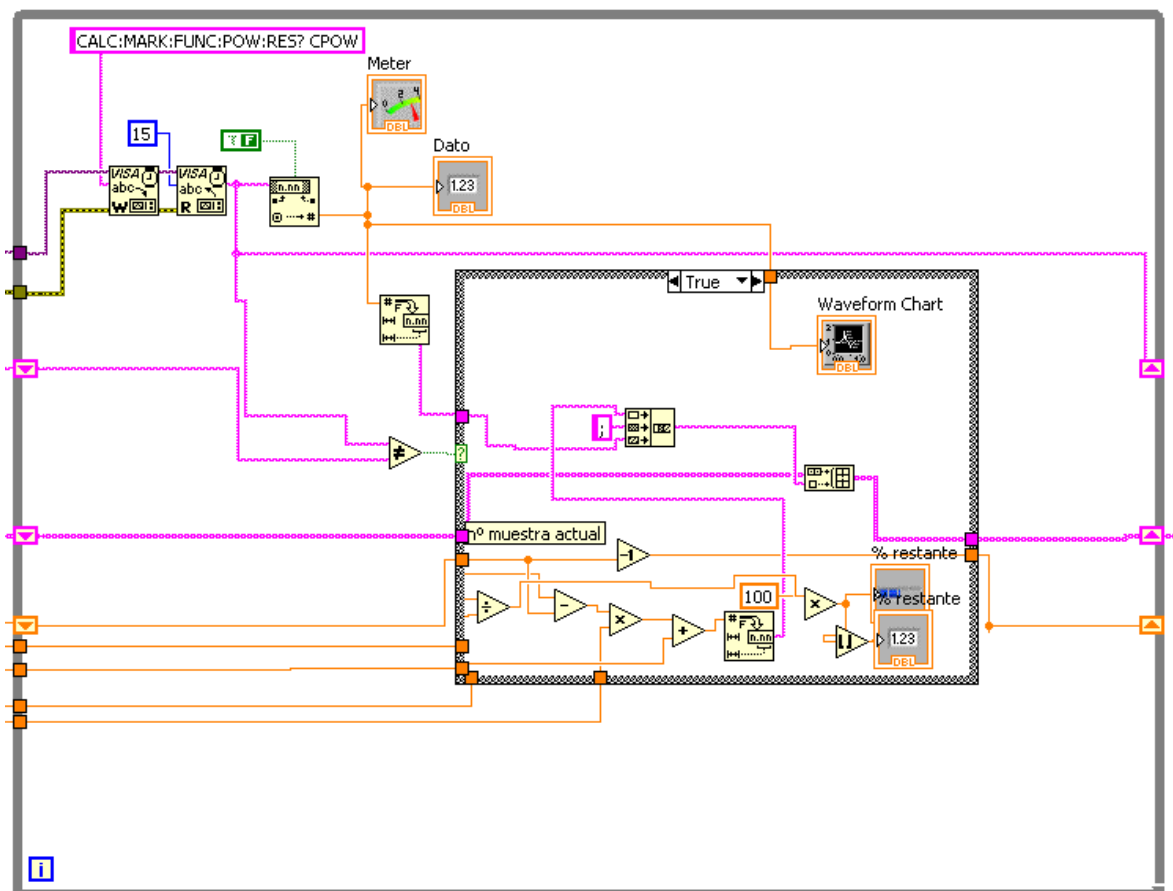


En cada iteración el programa solicita al ESA el valor del canal de integración (el dato que buscamos). El valor recogido en formato *string* se pasa a numérico y se muestra en dos indicadores, uno gráfico (*meter*) y otro numérico. Este valor se introduce como dato en los dos formatos al condicional *if*.

Como hemos dicho antes, se producen cinco o más iteraciones por cada paso del LS. Además, el ESA sólo refresca la medida a cada paso del ESA. Por lo tanto estamos obteniendo cinco o más datos repetidos por cada paso. Para solventar esto y quedarnos únicamente con un valor por cada paso del LS incluimos la condición *if* en la cual se compara el dato obtenido en la iteración actual con el obtenido en la anterior. Si ambos son iguales el programa continúa sin cambios. Sin embargo, si son diferentes el programa entiende que el LS ha dado un paso y actúa en consecuencia.

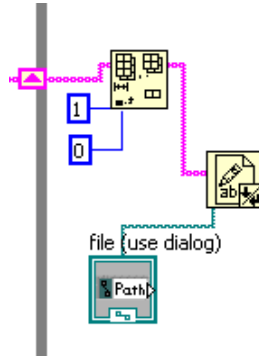
Concatena el nuevo dato obtenido en el ESA con un punto y coma de separación y el valor correspondiente de longitud de onda calculado a cada paso. Este *string* se incluye en la tabla de datos recogidos. A su vez dentro de la condición se disminuye en uno el número de muestras restantes. También a modo informativo se incluye el dato recogido en un gráfico de desarrollo, donde podremos ver una representación gráfica de los valores recogidos, para comprobar la calidad del barrido en tiempo real.

De la misma manera se opera con el número de muestras restantes y totales para mostrar como indicador el tanto por ciento restante del barrido así como su correspondiente barra de progreso. La parte de programación correspondiente a esta parte puede verse a continuación.



3. Generación del archivo de resultados

Por último, una vez finalizadas las iteraciones la tabla de valores recogida se guarda en un archivo que permite la sobre escritura y este archivo se guarda en la dirección introducida en el *path* del panel de control.



4. Panel de control

Hemos visto toda la programación interna del software, ahora sólo queda por ver el panel de control desde donde vamos a controlar y preparar cada barrido. Este panel consta de variables de entrada y de indicadores del progreso del programa.

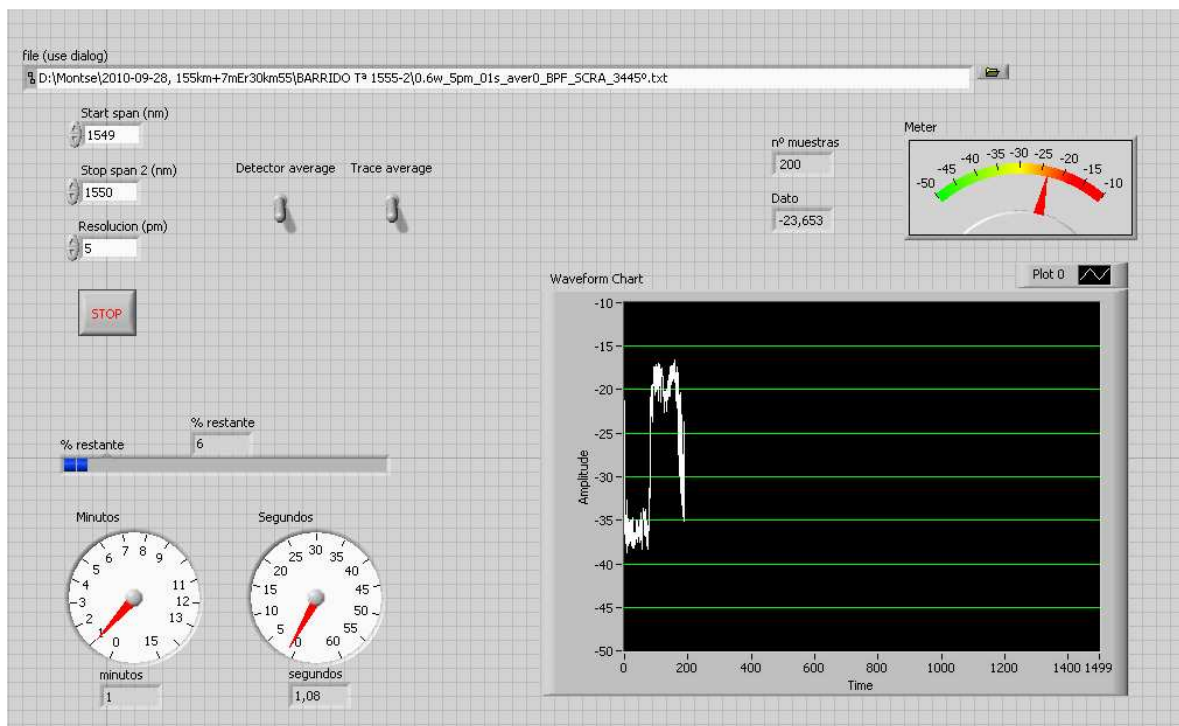
Datos y variables a introducir:

- *File (use dialog)*: Aquí introduciremos la ruta y nombre de archivo donde se guardará la traza obtenida en el barrido.
- *Start span (nm)*: Introduciremos el valor inicial del barrido en nanómetros.
- *Stop span (nm)*: Introduciremos el valor final del barrido en nanómetros.
- *Detector average*: Podremos activarlo o no si deseamos que el ESA lo active para la recogida de datos.
- *Trace average*: Podremos activarlo o no si deseamos que el ESA lo active para la recogida de datos.
- *Stop*: Con este botón abortamos el programa.

Indicadores y gráficos:

- *Nº muestras*: Es el número de muestras totales que va a tener el barrido.
- *Dato*: Es el último valor recogido.
- *Meter*: El último valor recogido representado gráficamente.
- *% restante*: Representa el % restante tanto en valor numérico como en barra de progreso.
- *Minutos y segundos*: Minutero y segundero de la duración del barrido.
- *Waveform Chart*: Representa gráficamente los valores recogidos hasta el momento en el barrido. Es el indicador más importante ya que nos da una idea

del progreso del barrido y nos permite cancelarlo sin tener que esperar a que finalice en el caso de que exista algún problema de ecualización.



ANEXO 2

Publicaciones

Fiber Bragg Grating interrogation technique for remote sensing (100km) using a hybrid Brillouin-Raman fiber laser

M. Fernandez-Vallejo, D. Leandro, A. Loayssa, and M. Lopez-Amo

Universidad Pública de Navarra, Dept. Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Campus de Arrosadía Pamplona, Spain

ABSTRACT

We propose and demonstrate the feasibility of a novel Fiber Bragg Grating interrogation technique for remote sensing based on the use of a hybrid Raman-Brillouin fiber laser configuration. The laser comprises 100 km of standard single-mode fiber (SMF) in a linear cavity configuration with four Fiber Bragg Gratings (FBGs) arranged in series. The FBGs are used both for the sensing function and for the selection of the lasing wavelengths. A wavelength-swept laser pumps Brillouin gain in the fiber cavity, which is previously set just under lasing threshold by the Raman gain. Furthermore, the sensor signal is detected in the radio frequency domain instead of the optical domain so as to avoid signal to noise ratio limitations produced by Rayleigh scattering. Experimental results demonstrate that the shift of the Bragg wavelength of the FBG sensors can be precisely measured with good signal to noise ratio when the FBG are used for temperature sensing.

Raman fiber laser, Brillouin fiber laser, fiber Bragg grating (FBG), Brillouin amplification, sensor multiplexing, sensor interrogation

1. INTRODUCTION

Fiber Bragg Grating (FBG) has attracted great interest in optical sensing technology because of its advantages. Hence FBGs have a huge potential to be applied to structural health monitoring, testing of composite material, smart structures or traditional strain, pressure, vibration, and temperature sensing, and so on [1, 2].

Interrogation systems must permit to obtain the Bragg wavelength shift when a physical measurand acts on the grating, thus the determination of the Bragg wavelength allows quantifying the state of a particular measurand. Interrogation techniques must provide high sensitivity to Bragg wavelengths shifts, large measurement ranges, immunity to optical power fluctuations, low environmental sensitivity, extension to sensor multiplexing, simplicity and low cost [3].

Different method has been reported for measuring the wavelength-encoded temperature or pressure changes of FBG. But probably, the sensor interrogation system with the greatest commercial success is based on a wavelength swept laser, which scans the reflection spectra of the Bragg gratings using the power detected by a photodiode. However, this type of systems is inherently limited in its reach due to Rayleigh scattering noise [4].

Recently, FBG sensor systems using a fiber laser scheme have been the focus of a great deal of research. These systems have been developed transforming the passive multiplexing structure in a multiwavelength fiber laser by the utilization of optical amplifiers. They have demonstrated several advantages, such as high resolution for wavelength shift, capability for remote sensing or high signal-to-noise ratio against the noisy environments in practical applications; in contrast with the FBG sensor system based on a broadband light source whose maximum distance is limited up to 25 km mainly due to Rayleigh Scattering [1, 5]. In order to further extend the reach of remote sensing it is necessary to find alternative interrogation techniques. Investigation in this area is under way with a few approaches of ultra-long-distance fiber Bragg Gratings sensor systems which go beyond 100km maintaining a good high signal to ratio [4, 6, 7]. In this work, we present and demonstrate the feasibility of a novel fiber Bragg Gratings sensor system for remote sensing (100km) using a hybrid Raman-Brillouin fiber laser. The experiment results prove that this method has advantages of high signal to noise ratio, remote sensing and immunity against the light source power fluctuations. The ultra long-distance FBG sensor system proposed could be suitable to detect landslides, tsunamis or to monitoring ocean bottom seismic from land among other applications [8, 9].

2. FUNDAMENTALS OF THE SYSTEM

Fig. 1 schematically depicts the proposed FBG interrogation technique for remote sensing merging a Raman laser and Brillouin amplification. The long-distance remote sensing system is based on SMF cavity and it can be divided into two different parts: the sensor unit itself and the monitoring station equipment. Both spaced by 100 km SMF.

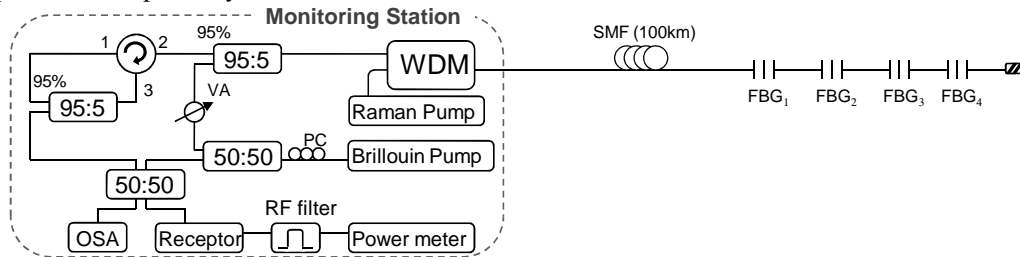



Fig.1. Experimental set-up for the novel FBG interrogation technique for remote sensing. WDM: wavelength division multiplexer. SMF: standard single mode fiber. : Index matched fiber end to suppress reflections. FBG: Fiber Bragg Grating. VA: Variable attenuator. PC: polarization controller.

The sensor unit consists of four FBGs located in a serial configuration and located within the Raman-amplified wavelength band. The selected wavelengths for the FBGs were: 1541.4 nm, 1545.1 nm, 1548.9 nm and 1555.1 nm, each one showing a bandwidth of 0.23 nm, 0.27 nm, 0.39 nm and 0.29 nm respectively and 99 % reflectivity. They act as wavelength selective reflectors for the lasing structure and simultaneously are the sensing transducers of the system.

The monitoring station subsystem consists of: A fiber loop mirror, made with an optical circulator, acts as one of the cavity mirrors. It includes a 95 % coupler to enable the extraction of 5% of the laser output power from the system and direct it to the receptor and the optical spectrum analyzer (OSA); A Raman pump laser deployed in order to generate distributed Raman amplification in the system by using 100 km long SMF. Pumping is provided by a fiber Raman laser that emitted at the wavelength of 1445 nm. This pump laser is injected into cavity by using a fiber wavelength division multiplexer (WDM). A tunable laser (1455-1640 nm) with a spectrum linewidth of 100 KHz acts as the Brillouin pump. The power launched by the tunable laser is split into two paths of equal power. The first branch leads the power to the cavity through a 5 % coupler to generate Brillouin amplification in the sensor network. A variable attenuator is added to optimize the Brillouin pump; The signal detection system uses a broadband receiver followed by a bandpass RF filter and a microwave power meter. In our actual experimental demonstration an electrical spectrum analyzer implements the last two elements. In addition, we would like to point out that the OSA displayed in Fig. 1 is only used to observe the spectrum but it does not belong to the sensor system. In a practical interrogation system the optical spectrum analyzer (OSA) should be eliminated because it is expensive and has a slow scanning speed [10].

The operation mode of the interrogation system is as follows. The Raman pump laser provides the enough gain in the cavity in order to the system is set just below the lasing threshold. Then the tunable laser, which provides the Brillouin gain, makes a sweep in wavelength. When it is sweeping in wavelength, there are two possible situations: Firstly, when the wavelength of the tunable laser matches with the reflection band of one of the FBGs. Then the hybrid Raman-Brillouin gain is enough to the laser action takes place. The laser signal wavelength is separated from the tunable laser wavelength by the Brillouin frequency shift in the fiber; Otherwise, when the tunable laser wavelength is outside the FBGs band. There is just Rayleigh reflection of the laser and some spontaneous Brillouin scattering, but there is not laser signal.

The 95:5 coupler, located in the loop mirror, is used to tap the signals from the fiber cavity. This signal is combined with the 50% of the power of the tunable laser and detected in broadband receiver getting a heterodyne detection system. This detection system overcomes the problem of low signal to noise ratio due to Rayleigh noise which usually limits the wavelength-swept laser interrogation system. With our detection method Rayleigh noise is relegated to low frequencies (around DC) in the detected electrical signal, whereas the fiber laser signal is transferred to noise-free RF frequencies around the Brillouin frequency shift in the fiber. Therefore, a high signal to noise ratio is attained. The bandwidth of the deployed bandpass RF filter needs to be wide enough to accommodate the change in Brillouin frequency shift as the wavelength is tuned [11]. In our particular implementation a 240 MHz bandwidth is chosen.

3. EXPERIMENTAL RESULTS

The developed system utilizes lower Raman pump powers than needed in previously long-distance reported systems without Brillouin amplification [12-15]. The Raman pump used is lower than 0.8 W when the reflected signals from the FBGs start to be detected at the OSA (Fig. 2 (a)). Once we detect the four reflected lasing wavelengths from the FBGs, the tunable laser of the monitoring station is switched on and begins to sweep across the entire spectrum to interrogate the FBGs. The tunable laser can sweep the spectrum in steps of 1, 5 or 10 pm, spending 0.1 s in each step. When the tunable laser wavelength matches with the wavelengths of the FBGs, Brillouin amplification is excited; hence lasing takes place and one or more Stokes waves appear (Fig. 2 (b)). These Stokes waves and Brillouin pump are spaced approximately 0.08 nm (Brillouin frequency shift), thus Stokes waves remain within the bandwidth of the gratings. However, when the tunable laser wavelength does not match the wavelength band of the FBGs, the Stokes waves generated shows very low power (Fig. 2 (c)). Inset of Fig 2 (b) and (c) show in detail how the Stokes waves vary in both aforementioned situations. Taking into account the 1st Stokes wave the power difference reached is around 20 dB, which results in a high signal to noise ratio. The Resolution Bandwidth (RB) of the OSA was fixed at 0.02 nm.

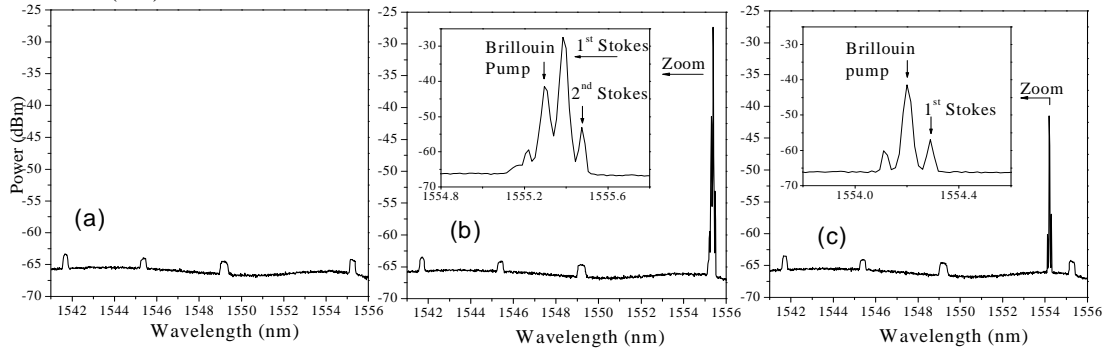


Fig.2. (a) OSA spectrum with tunable laser off and Raman pump=0.77W. (b) OSA spectrum when tunable laser wavelength matches with FBGs wavelengths. (c) OSA spectrum when tunable laser wavelength does not match with FBGs wavelengths.

As the tunable laser sweeps the spectrum, the detector collects the total power received at each step. The electrical spectrum analyzer selects the received power in the band centered at 10.825 GHz that comes from the heterodyne process caused by beating the tunable laser signal and the Stokes signals. It is well-known that Stokes shift (the spectral distance between these signals) is around 10 GHz and both signals are locked. For this reason, the detector needs at least a 240 MHz bandwidth to be able to capture the power regardless which FBG is being interrogated. When tunable laser has completed a full scan of the bandwidth of interest, we obtain a spectral response as depicted in Fig. 3.

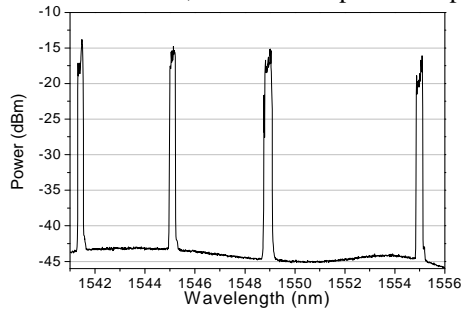


Fig. 3. Measured output spectrum of the FBG interrogation technique for remote sensing

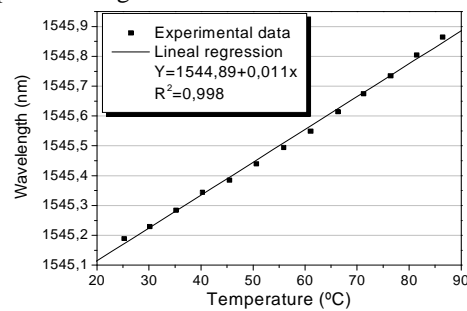


Fig. 4. Wavelength shift of the FBG centred at 1545.1 nm against temperature.

Fig. 3 shows that the signal to noise ratios from the four FBG remotely multiplexed in the network varies from 28 dB, in the worst case, to 30 dB in the best one. It was captured using a Raman pump power of 0.77 W, when the Brillouin pump laser power was fixed to 4 mW. This power was optimized by the variable attenuator, thus the real Brillouin pump power launched to the cavity was 1.35 mW. The tunable laser covered the spectrum in steps 10pm and remained at each step for 0.1 s.

The proposed long distance FBG sensor system has some advantages over some previously reported ones in the literature. First, the obtained signal to noise ratio of 30 dB is much greater than in the traditional system of interrogation, where the main constraint is imposed by Rayleigh scattering. Takanori Saitoh, et al, developed a system which reached an OSNR of 19 dB when the sensor system was 100km long [12].

Secondly, the Raman pump power used, 0.77 W, is lower than in systems where the length achieved is 50km as the proposed by J.-H. Lee and Y.-G. Han [2]. Hence, our system faces some disadvantages of the long-distance sensor systems solely based on multiwavelength Raman lasers. On the one hand, in a serial multiwavelength laser system it is a complicated task to adjust correctly the cavity losses at each wavelength to achieve oscillation in all the desired channels. A solution, proposed in [15] consists on disposing the FBGs in a parallel configuration, but the price to pay is a much higher Raman pump power. Therefore, our system is specially suited for the usual FBGs sensors arrays.

Finally, to evaluate the sensing performance of our 100 km long system the wavelength shift of the measured wavelengths has been analyzed by varying the temperature from 25 °C to 86 °C. Thus, one of the FBGs has been placed into a climatic chamber in order to observe its behavior when temperature changes. To increase the resolution of the system, the tunable laser has swept the spectrum in steps 5 pm along 0.1 s. Fig. 4. shows the central wavelength shift of the FBG when temperature increases. To evaluate it we have taken into account the shape of the FBGs reflected spectra falling edge. It is possible to observe that the shift of the Bragg wavelength of the FBG sensors can be precisely interrogated: the center wavelength shift presents a clear linear behavior and the temperature sensitivity is 11 pm/°C.

4. CONCLUSIONS

We have experimentally demonstrated a novel FBG interrogation technique for remote sensing (100km) using a hybrid Brillouin-Raman fiber laser. The receptor works in the electric domain processing RF frequencies. Moreover, the SNR provided by FBG for the sensor system are over 28 dB, even when the sensing location is 100 km from the monitoring station. The application of the remote sensing system has been studied for temperature sensing. The wavelength shift shows a good linear behaviour. The main advantages of the proposed method are: the high signal to noise ratios, from the four FBG remotely multiplexed in the network it varies from 28 dB to 30 dB; remote sensing (100 km), and immunity from the light source power fluctuations.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Spanish Government project TEC2007-67987-C02 and TEC2010-20224-C02-01.

REFERENCES

- [1] Kersey, A. D., Davis, M. A., Patrick, H. J., LeBlanc, M., Koo, K. P., Askins, C. G., Putnam, M. A. and Friebele, E. J. , "Fiber grating sensors," *J.Lightwave Technol.* 15(8), 1442-1462 (1997).
- [2] Han, Y., Tran, T. V. A., Kim, S. and Lep, S. B. , "Development of a multiwavelength Raman fiber laser based on phase-shifted fiber Bragg gratings for long-distance remote-sensing applications," *Opt.Lett.; Opt.Lett.* 30(10), 1114-1116 (2005).
- [3] Lopez-Higuera, J. M., [Hand Book of Optical Fibre Sensing Technology] (2002).
- [4] Saitoh, T., Nakamura, K., Takahashi, Y., Iida, H., Iki, Y. and Miyagi, K., "Ultra-long-distance fiber Bragg grating sensor system," *IEEE Photonics Technol Lett* 19(20), 1616-1618 (2007).
- [5] Peng, P., Tseng, H. and Chi, S., "Long-Distance FBG Sensor System Using a Linear-Cavity Fiber Raman Laser Scheme," *IEEE Photonics Technol Lett* 16(2), 575-577 (2004).
- [6] Saitoh, T., Nakamura, K., Takahashi, Y., Iida, H., Iki, Y. and Miyagi, K., "Ultra-long-distance (230 km) FBG sensor system," (2008).
- [7] Rao, Y., Feng, S., Jiang, Q. and Ran, Z., "Ultra-long distance (300km) fiber Bragg grating sensor system using hybrid EDF and Raman amplification," (2009).
- [8] Nakstad, H. and Kringlebotn, J. T., "Realisation of a full-scale fibre optic ocean bottom seismic system," (2008).
- [9] Guru Prasad, A. S., Asokan, S. and Tatavarti, R., "Detection of tsunami wave generation and propagation using fiber bragg grating sensors," 1278-1281 (2009).
- [10] Zhou, D., Wei, L., Liu, W. and Lit, J. W. Y. , "Simultaneous strain and temperature measurement with fiber Bragg grating and multimode fibers using an intensity-based interrogation method," *IEEE Photonics Technology Letters* 21(7), 468-470 (2009).
- [11] Sagues, M., Olefina, R. G., Loayssa, A., Sales, S. and Capmany, J., "Multi-tap complex-coefficient incoherent microwave photonic filters based on optical single-sideband modulation and narrow band optical filtering," *Optics Express* 16(1), 295-303 (2008).
- [12] Ball, G. A., Morey, W. W. and Cheo, P. K., "Single- and multipoint fiber-laser sensors," *IEEE Photonics Technology Letters* 5(2), 267-270 (1993).

- [13] Talaverano, L., Abad, S., Jarabo, S. and López-Amo, M., "Multiwavelength fiber laser sources with Bragg-grating sensor multiplexing capability," *J.Lightwave Technol.* 19(4), 553-558 (2001).
- [14] Lee, J. H., Kim, J., Han, Y. -, Kim, S. -. and Lee, S. B. , "Investigation of Raman fiber laser temperature probe based on fiber Bragg gratings for long-distance remote sensing applications," *Opt.Express* 12(8), 1747-1752 (2004).
- [15] Fernandez-Vallejo, M., Díaz, S., Perez-Herrera, R.A., Passaro, D., Selleri, S., Quintela, M.A., López Higuera, J.M., Lopez-Amo, M., "Resilient long-distance sensor system using a multiwavelength Raman laser," *Meas. Sci. Technol.* 21, 094017 (5pp) (2010).

Remote (155 km) fiber Bragg grating interrogation technique combining Raman, Brillouin and Erbium gain in a fiber laser.

D. Leandro, A. Ullan, A. Loayssa, *Member, IEEE*, J.M. Lopez-Higuera, *Senior Member, IEEE*, and M. Lopez-Amo, *Senior Member, IEEE*

Abstract— We present and demonstrate a technique for remote sensing of fiber Bragg gratings (FBG) beyond 150 km. The system combines Raman, Brillouin and erbium gain in a linear cavity fiber laser and deploys a novel heterodyne detection technique to avoid the signal to noise ratio limitations produced by Rayleigh scattering. Two FBGs located in series were interrogated at 155 km away from the processing unit using 0.6 W of Raman pump and less than 2mW of Brillouin pump provided by a tunable wavelength-swept laser. Heterodyne detection brings forth a signal to noise ratio of approximately 10 dB in our measurements.

Index Terms—Remote sensing, Raman fiber laser, Brillouin fiber laser, Fiber Bragg Grating (FBG), sensor multiplexing, interrogation technique.

INTRODUCTION

Remote sensing has attracted the attention of many researchers in the last years. Much effort has been carried out in order to increase the distance between the sensor and the processing unit as well as the number of multiplexed sensors [1-4]. Structural health monitoring of oil pipes, landslides monitoring or Tsunami's prediction from land are some of the applications justifying this growing interest. Fiber Bragg gratings (FBG) are the most common sensor used for this purpose due to its low cost, high sensitivity, electromagnetic immunity, compactness, great multiplexing capability and resistance to harsh environments. The shift with temperature or strain changes of the reflected wavelength is used as sensing mechanism [5].

For remote FBG sensing systems, the maximum transmission distance with a broadband light source is

Manuscript received November 17, 2010. This work was supported by the Spanish Government projects TEC2007-67987-C02 and TEC2010-20224-C02.

D. Leandro, A. Loayssa and M. López-Amo are with the Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica of Universidad Pública de Navarra, Pamplona, 31006, Navarra, Spain (e-mail: mla@unavarra.es)

A. Ullan and J. M. López-Higuera are with the Photonics Engineering Group, Dept TEISA, Universidad de Cantabria, Santander, 39005, Spain (e-mail: angel.ullan@unican.es).

normally limited to 25 km because of the Rayleigh scattering

and the intrinsic losses of the fiber link. Different approaches have been proposed in order to go beyond this limit. In particular, in fiber linear cavity lasers are one of the most promising configurations. It allows for a much larger measurement range, as well as a higher precision in the wavelength determination. The longest reported system to our knowledge without backward pumping reaches 230 km for a single strain FBG sensor, with 4dB signal-to-noise ratio (SNR) [6]. A 300-Km remote sensing system has been presented [3], but it uses backward Raman pump, requiring the presence of a power supply at the end of the sensing line. In addition, at the time of writing this paper, another system combining Erbium and Raman amplification has been just presented [7]. It is used to interrogate one FBG at 100 km away from the processing unit.

In this letter, we demonstrate a novel method for ultra-long range remote sensing of FBG sensors. It is based on using a linear cavity fiber laser with Raman and Erbium amplification, combined with Brillouin gain. Furthermore, heterodyne detection is deployed to reduce Rayleigh scattering noise in the measurement of the resonant signal, providing a crucial increase in the SNR.

EXPERIMENTAL SETUP

The experimental setup used for our measurements is shown in Fig 1. We can split it into three parts: sensing unit, transmission channel and processing unit. The sensing unit consists of two FBGs disposed in series, which are used both for the sensing function and as wavelength-dependent mirrors for the selection of the lasing lines in the cavity. The FBGs were centered at 1553.7 nm and 1555.1 nm with a reflectivity of 99% and a FWHM of 0.4 nm and 0.29 nm respectively. The channel is composed of 155 km of standard single-mode fiber (SMF) and a spool of 7 m of highly doped Erbium fiber (EDF) provided by Liekki. (Er-30, with absorption of 10.8 dB/m at $\lambda=978$ nm). Raman, Brillouin and erbium amplification takes place all along the channel. The EDF was inserted after 55 km in order to optimize the combined amplification effect. Finally, the processing unit includes another cavity mirror (consisting of a 3-ports optical circulator and a 95:5 optical

coupler linking port 3 to port 1 and extracting 5% of the resonant signal), a Raman pump laser emitting at 1445 nm, a wavelength-tunable laser source (TLS) with a spectral linewidth of 100 kHz acting as Brillouin pump (BP) and the signal analyzing equipment. In addition, a wavelength-tunable filter with 1-nm bandwidth is placed before the cavity mirror.

The measurement technique works in the following way: the Raman laser pumps the channel, giving rise to an active medium whose gain curve is the combination of Raman and Erbium gain profiles. The power launched into the channel has to be enough to induce Raman amplification and to pump the EDF [8]. The total gain in the cavity should be just enough to set the fiber laser below the lasing threshold. Then, once the medium is activated, we switch on the TLS with a power of less than 2 mW. The TLS sweeps its emitted wavelength and pumps stimulated Brillouin scattering along the fiber. When the emitted wavelength is out of the FBG reflecting bands the attenuation of the cavity is too high and there is no lasing, so that only a weak Stokes line is produced. However, when the TLS wavelength falls inside one of the FBG reflecting bands the round-trip attenuation for the Stokes lines is reduced and the hybrid nonlinear gain provided by the Brillouin and Raman scattering effects together with the linear gain in the EDF is enough for the Stokes component to start lasing, as it is shown in figure 2. This laser signal wavelength is separated from the tunable laser wavelength by the Brillouin frequency shift in the fiber. Note that when the TLS starts running a wavelength sweep around the two FBGs, the tunable filter of the processing unit gets anchored to it and moves simultaneously. This cleans up the signal coming into the receiver reducing considerably the noise level.

The signal detection system is based on beating the TLS signal with the Stokes signal in a broadband (12 GHz) photodiode. As it was mentioned above these two signals are locked in optical frequency, hence it is possible to measure the Stokes signal amplitude in the electrical domain at microwave frequencies. The signal that comes into the photodiode is composed by a fraction (50%) of the TLS output (just to reinforce the beating) and a fraction (5%) of the signal resonating in the cavity. A variable attenuator is used to adjust the power of the BP and a polarization scrambler helps to stabilize the measurements by mixing up all the possible polarization states. The beating between the TLS output and the resonating signal gives rise, in the electrical domain, to a peak around the Brillouin frequency shift (ν_B) for this fiber, which is 10.825 GHz. The power of this peak is our mesurand and it is integrated using a bandpass filter followed by a microwave power meter. In our actual experimental demonstration an electrical spectrum analyzer (ESA) implements these two elements. The integration frequency interval was 250 MHz and averaging techniques were used. Note that the integration interval has to be wide enough to stand for the change in ν_B with wavelength [9]. The total integrated power varies with the wavelength because it depends directly on the intensity of the Stokes line. This detection system overcomes the problem of low SNR due to Rayleigh noise which usually limits the wavelength-swept laser interrogation system. With our detection method Rayleigh noise is relegated to low frequencies (around DC) in

the detected electrical signal, whereas the fiber laser signal is transferred to noise-free microwave frequencies around the Brillouin frequency shift in the fiber. Therefore, a high signal to noise ratio is attained. In addition, we would like to point out that the OSA displayed in Fig. 1 is only used to observe the spectrum but it does not belong to the sensor system.

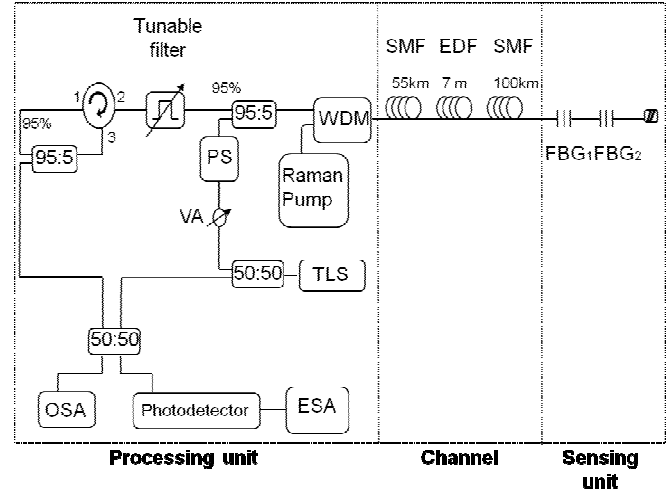


Fig. 1. Experimental setup used for remote interrogation of two FBGs. WDM: wavelength division multiplexer. SMF: standard single-mode fiber. ■ : Index matched fiber end to suppress reflections. FBG: fiber Bragg grating. VA: variable attenuator. PS: polarization scrambler.

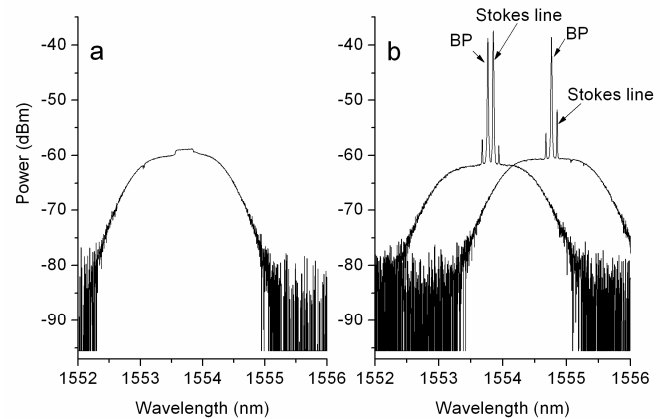


Fig. 2. (a) Optical spectrum measured with the OSA when only the Raman pump is launched into the channel. The FBG is centered at 1553.7 nm with a FWHM of 0.4 nm. (b) Optical spectrum of the resonating signal when the TLS launched into the channel is placed in and out the FBG reflecting band.

RESULTS

In order to interrogate the sensor unit, 0.6 W of Raman pump laser were launched into the channel. Fig. 3 shows the power of the beating peak around ν_B (within the aforementioned integration interval) for a wavelength sweep along the two FBGs. As we can see, both gratings are detected with a SNR of approximately 10 dB. This is the lowest reported Raman pump power making possible to interrogate a

155-km away FBGs array with such a SNR, to the best of our knowledge.

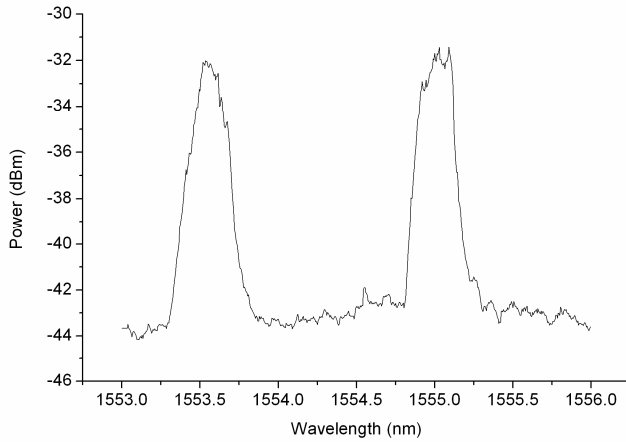


Fig. 3. Integrated power of the beating peak around ν_B . The two peaks correspond to the FBG reflecting bands where SBS takes place.

The spectral separation between the two FBG was 1.4 nm, which allows for a wide sensing range. In order to test the sensing capability of the system, one of the FBGs was located in a climatic chamber and heated up from 25°C to 70°C. The results show the typical linear behavior of an FBG, shifting its reflective band in 10 pm/°C as shown in figure 4. To determine the wavelength shift we took the position for which our mesurand falls below -36 dB at each temperature stage.

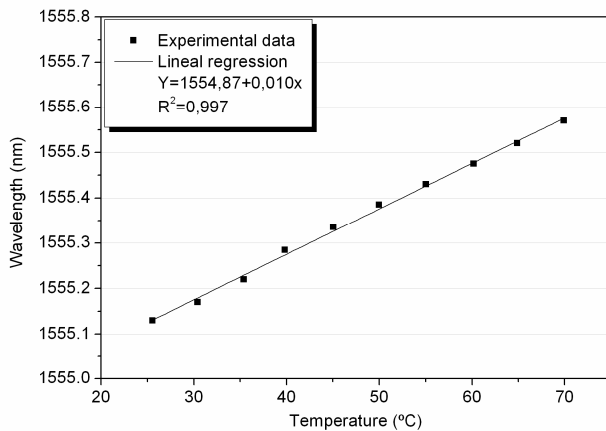


Fig. 4. Wavelength shift of the FBG with the temperature.

SUMMARY AND CONCLUSIONS

We have presented and demonstrated a sensing system capable to interrogate two FBGs in series located 155km away from the processing unit, combining Raman, Erbium and Brillouin gain in a linear cavity fiber laser. The system provides a 10 dB SNR and its capability for sensing temperature changes with a sensitivity of 10pm/°C has been proven, with only 0.6W of Raman pump. The heterodyne detection of the beating peak between the Brillouin pump and its corresponding Brillouin scattering Stokes line is carried out during the measurements. The power of this peak is used as

the parameter to detect the position of the FBGs, preventing from the effect of Rayleigh scattering in the SNR. To the best of our knowledge, this is the first time that two sensors are interrogated simultaneously at such a distance from the processing unit.

ACKNOWLEDGMENT

Especial thanks are due to Liekki for providing the highly doped Erbium fiber.

REFERENCES

- [1] T. Saitoh, K. Nakamura, Y. Takahashi, H. Iida, Y. Iki, K. Miyagi, "Ultra-long-distance fiber Bragg grating sensor system," *IEEE Photonics Technol. Lett.* Vol. 9, No.20, pp. 1616-1618 (2007).
- [2] S. Diaz, S. Abad, M. Lopez-Amo, "Fiber-optic sensor active networking with distributed erbium-doped fiber and Raman amplification," *Laser Photonics Rev.* Vol. 2, No. 6, pp. 480-497 (2008)
- [3] Y. J. Rao, S. Feng, Q. Jang and Z. L. Ran, "Ultra-long distance [300km] fiber Bragg grating sensor system using hybrid EDF and Raman amplification," *Proc. of SPIE*, Vol. 7503 p. 75031Q (2009).
- [4] M. Fernandez-Vallejo, S. Diaz, R. A. Perez-Herrera, D. Passaro, S. Selleri, M. A. Quintela, J. M. Lopez-Higuera and M. Lopez-Amo, "Resilient long-distance sensor system using a multiwavelength Raman Laser," *Meas. Sci. Technol.* Vol. 21 n.9 pp. 094017 (2010)
- [5] J. M. Lopez-Higuera. *Handbook of optical fibre sensing technology*, Wiley & Sons (2002)
- [6] T. Saitoh, K. Nakamura, Y. Takahashi, H. Iida, Y. Iki and K. Miyagi, "Ultra-long-distance [230 km] FBG sensor system," *Proc. of SPIE* Vol. 7004, 70046C-1-4 (2008)
- [7] J. Hu, C. Zhihao, X. Yang, J. Ng and C. Yu, "100 km long distance fiber Bragg grating sensor system based on Erbium-doped fiber and Raman amplification," *IEEE Photonics Technol. Lett.* Vol. 22, No.19, pp. 1422-1424 (October 2010).
- [8] M. Fernandez-Vallejo, R. A. Perez-Herrera, C. Elosúa, C. Barriain and M. Lopez-Amo, "Stable multiwavelength fiber laser for referencing intensity sensor networks using multiple amplified ring resonators," *Fourth European Workshop on Optical fibre Sensors (EWOFS '10)* *Proc. of SPIE* Vol. 7653 pp. 76533V1-4 (2010)
- [9] M. Sagues, R. Garcia-Olcina, A. Loayssa, S. Sales and J. Capmany, "Multi Tap Complex Coefficient Incoherent Microwave Photonic Filters Based on Stimulated Brillouin Scattering," *Opt. Express*, Vol.16, No. 1, pp. 295-303 (2008)

L-Band Multiwavelength Erbium-Doped Fiber Ring Laser for Sensing Applications

R. A. Perez-Herrera^a, A. Ullan^b, D. Leandro^a, M. Fernandez-Vallejo^a, M.A. Quintela^b, A. Loayssa^a, J. M. Lopez-Higuera^b and M. Lopez-Amo^a

^aDepartment of Electric and Electronic Engineering, Universidad Pública de Navarra, Campus Arrosadía s/n E-31006 Pamplona, Spain.

^bPhotonics Engineering Group, University of Cantabria, Cantabria, Spain.

ABSTRACT

In this work, a novel single-longitudinal-mode (SLM) four-wavelength laser configuration for sensing applications in L-band is proposed and experimentally demonstrated. This spectral region presents some advantages for the detection of dangerous gases. The sensor system presented here is based on ring resonators, and employs fiber Bragg gratings to select the operation wavelengths. The stable SLM operation is guaranteed when all the lasing channels present similar output powers. It is also experimentally demonstrated that when a SLM behavior is achieved, lower output power fluctuations are obtained.

Keywords: Erbium-doped fiber (EDF), fiber Bragg grating (FBG), multiwavelength lasing, optical fiber amplifier, optical fiber ring laser, single-longitudinal mode (SLM).

INTRODUCTION

Detection of trace gases such as methane, carbon monoxide and carbon dioxide is extremely important both for pollution monitoring and for safety reasons in the oil and gas industries, in water treatment plants, in landfill sites and in commercial or domestic environments, where methane gas may filter up through the ground and create an explosion hazard (the lower explosive limit, LEL, for methane is 5% by volume methane gas) [1]. Fiber optical sensors based on direct absorption spectroscopy, operating in the 1–2 μm spectral region, allow safe, remote location of sensors combined with the availability of low cost fiber components, connectors and compact gas cells. Several demonstrations of the application of the L-band hollow-core photonic bandgap fibers (HC-PBF) to the detection of methane have been reported in the literature [2]. It is therefore of commercial interest to develop portable gas sensors, based on optical techniques [3]. Optical sensors, based on semiconductor sources, have the potential advantages of: (i) intrinsically safe, (ii) ability to detect a specific gas by selection of appropriate wavelengths, (iii) able to operate in zero-oxygen environment (e.g. for purging of pipe lines), and (iv) low cost of maintenance, since the gas-detection principle is a physical process (not a chemical reaction), and therefore, poisoning of the sensor is not an issue (although dirt/contamination on the optics needs to be considered in the sensor design).

Regarding these optical techniques, it is worth noticing that stable single-longitudinal-mode (SLM) erbium-doped fiber lasers (EDFLs) have attracted great interest recently, because they can be potentially applied in fiber sensing systems, dense wavelength division multiplexed (DWDM) communications, high-resolution spectroscopy, and microwave photonics fields [4]. Several approaches have been employed to implement SLM operation in EDFLs, such as short linear cavity distributed Bragg reflector fiber lasers, fiber distributed feedback lasers, and fiber ring lasers [5] with different ring-cavity configurations. However, the fiber ring laser unavoidably generates an enormous number of densely spaced longitudinal modes lying beneath the erbium gain profile due to the required intracavity optical components, connecting fibers, and a rather long cavity length. Thus, fiber ring lasers usually perform unstably with a larger linewidth due to the multimode oscillation, mode competition, and hopping. To achieve SLM operation, a number of techniques have been proposed to ensure a long-term stable performance in EDFLs. Several previous studies proposed by the authors [5] show that, a single-mode operation of these laser systems in the C-band can be achieved when we emit simultaneously two wavelengths using a special ring cavity configuration. In this paper, we report, for the first time to our knowledge, a single-mode operation of an EDFL system operating in the L-band and for sensing applications; when we emit simultaneously four wavelengths using a specific ring cavity configuration. The stable SLM operation in this band is also guaranteed if the output power of all channels is similar. This implies that it is possible to avoid the utilization of additional optical filtering techniques (that reduce the optical efficiency) to achieve the SLM operation.

EXPERIMENTAL SET UP

The experimental setup of the proposed multiwavelength erbium-doped fiber ring laser (MEDFRL) is shown in Fig. 1. This set-up comprises an L-band EDFA module (EDFA-B-L-33 provided by MANLIGHT), four circulators, four FBGs

in the L-band, four variable attenuators (VA) and one 4x2 optical coupler. This coupler is used for collecting the four arms signals and for extracting part of the optical output laser from the ring to the output port. The wavelength selection is carried out by means of FBGs and are centered at 1587.7 nm, 1591.9 nm, 1599.9 nm and 1610.2 nm with a corresponding full-width at half maximum (FWHM) of 0.17 nm, 0.18 nm, 0.27 nm and 0.08nm, respectively. In this topology, the FBGs reflected signals are inserted into the ring by using optical circulators conforming a serial topology and ensuring unidirectional operation and therefore, avoiding the spatial hole-burning (SHB) effect. Because of this, the use of isolators to ensure the unidirectional oscillation in this configuration was not necessary.

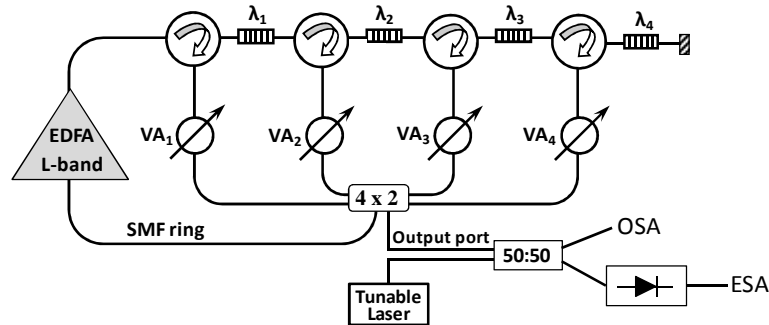


Fig. 1. Proposed single-longitudinal-mode four-wavelength fiber laser for sensors applications.

One of the major problems in multiwavelength ring lasers is that the oscillation threshold power for each wavelength is different due to the non-uniform shape of the EDF gain profile. As a consequence, variable attenuators (VA) have been connected to each FBG in order to correctly adjusting the cavity losses on each wavelength to achieve oscillation of the system in all the desired channels. All the free terminations have been immersed in refractive-index-matching gel to avoid undesired reflections. Several previous studies show that, in order to simplify this kind of setups, polarization maintaining (PM) components can be eliminated because of not having significant impact on the output power stability [6]. The laser output is monitored by an optical spectrum analyzer (OSA) with a highest spectral resolution of 0.01 nm. Single-longitudinal-mode lasing is verified by heterodyne detection of the output signal. Each laser line is combined with the output of a commercial tunable laser source (TLS) with a linewidth of 100 KHz closely located in the spectrum. In this way, the beating signal is observed by means of an ESA, whose resolution bandwidth can be as good as 1Hz.

EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSIONS

The output spectrum of the MEDFRL for a 23 dBm pump power is shown in Fig. 2. As can be shown in this figure four lasing channels are obtained. The power of each of the four output channels is around -27 dBm. For the four channels, the signal power is more than 50 dB higher than the amplified spontaneous emission (ASE) noise floor. Several previous studies show that these values are reasonably good for most sensor applications [7].

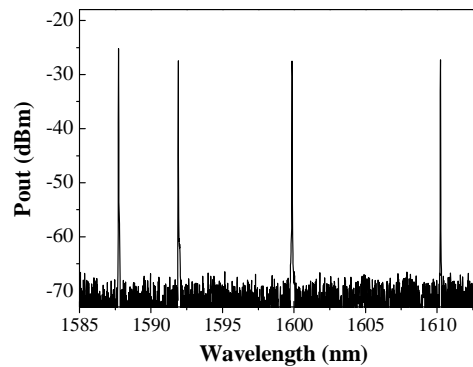


Fig. 2. Output optical spectrum for the MEDFRL circulators configuration with a pump power of 23 dBm.

As it is well known, in this type of configurations, multiple longitudinal modes are supported by the cavity. However, as it will be exposed in this work, under some specific conditions, such as for similar pumping levels, a single-mode operation of the laser can be achieved. As reported in previous works by the authors [5], a SLM fiber ring laser can be made to annihilate the mode competition by using multiple lasing wavelengths. In this work, owing to the interaction of the seed light produced from one channel to the others and vice versa, multiple-longitudinal-mode oscillation can be suppressed, as can be seen in Fig. 3(a) and (b), and thus the mode competition and mode hopping is not produced. In these figures, the beat note spectrum between the tunable laser we used and the obtained single-longitudinal mode signal

is presented. They show the obtained results when this tunable laser is fine tuned to the first (a) and second (b) wavelength laser emission in order to perform heterodyne detection.

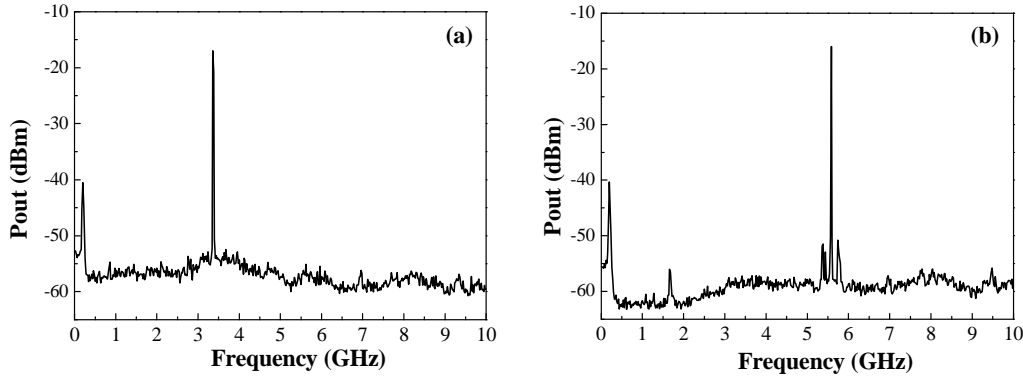


Fig. 3. Output optical spectrum measured by the ESA for the MEDFRL circulators configuration when the tunable laser was tuned to the first (a) and second (b) wavelength laser emission.

In addition to this, authors would like to underline the fact that there are no peaks at low frequency except for a beat that is attributed to the residual side modes of the TLS. Thus, we can assure that these four wavelength lasers have a single-longitudinal mode operation simultaneously. It is also worth noticing that the sidebands of the tunable laser can be also observed, as can be easily detect in Fig 3 (b), located very close to the beat peak. Due to the fact that only one peak is obtained for all the studied cases and taking into account that the resolution bandwidth of the ESA is good enough to discriminate two longitudinal modes separated about $8 \cdot 10^{-12}$ nm, we can assure that this laser presents a SLM operation condition for all the channels at the same time. These measurements have been repeated at different emission wavelengths in the L-band. In all cases, an SLM operation for all the channels is achieved when all of these lasing wavelengths are oscillating simultaneously with similar output powers by using the VAs to adjust the cavity losses.

The utilization of this new laser for sensor multiplexing was carried out using the FBGs as temperature sensors. The temperature response of the sensors was tested by heating them on a climatic chamber in the range of 27°C to 75°C. As can be seen in Fig 4, the center wavelength shift for the laser centered at 1610 nm presents a clear linear behavior (the mean square error is very close to 1) and a temperature sensitivity of about 10 pm/°C was measured for a three-wavelength EDFRL.

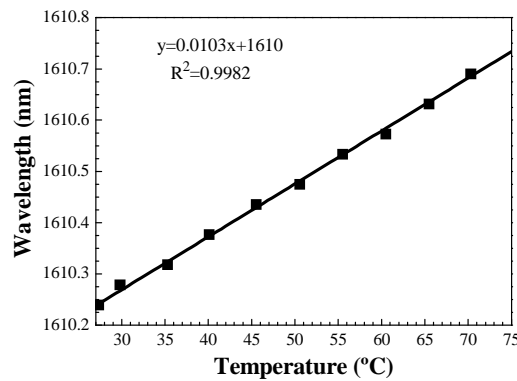


Fig. 4. Wavelength shift of one sensor against temperature for the three-wavelength EDFRL.

The power of the laser output can suffer some changes with time. For this reason, the temporal variations of the output power were also measured and analyzed on this MEDFRL. The instability is defined as the output power for a given interval of time and a specific confidence level (CL). This is the probability value associated with a confidence interval (CI), given as a percentage. The CI is the estimated range of values where the parameter of interest is included 0.

It has been also experimentally demonstrated that when a SLM behavior is achieved, lower output power fluctuations are obtained. We have tested the sensor system during a period of 30 minutes. The measured data have been stored each 30 s and a CL of 90% was considered. Just to give data, for a dual-wavelength EDFRL at room temperature, the power averaged variation was around 2.1 dB for a multiple-longitudinal mode (MLM) behavior, and this value improves to be about 1.2 dB for a SLM operation.

Although we can conclude that a SLM operation implies also a remarkable improvement in terms of output power variations, the obtained results show that this configuration requires a more adequate control of the cavity losses on each wavelength to achieve oscillation of the system in all the desired channels and in order to obtain a very good equalized lasing system. This is an important study that we plan to perform because, in practice, it is not straightforward to achieve the optimum condition because of the availability of the optical variable attenuators and, therefore, it is relevant to know the level of performance degradation when, for example, the output power levels have great different values.

CONCLUSIONS

A novel single-longitudinal-mode four-wavelength laser configuration for sensing applications in L-band has been experimentally demonstrated in this work. This sensor system presented here is based on ring resonators, and employs fiber Bragg gratings to select the operation wavelengths. The stable SLM operation is guaranteed when all the lasing channels present similar output powers. It is also experimentally demonstrated that when a SLM behavior is achieved, lower output power fluctuations are obtained.

ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support from the Spanish Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología within projects TEC2007-67987-C02-02 and TEC2010-20224-C02-01 is acknowledged.

REFERENCES

- [1] Massie, C., Stewart, G., McGregor, G. and Gilchrist, J.R., "Design of a portable optical sensor for methane gas detection," *Sensors and Actuators B* 113(2), 830-836 (2006).
 - [2] Cubillas, A.M., Silva-Lopez, M., Lazaro, J.M., Conde, O.M., Petrovich, M.N., and Lopez-Higuera J.M., "Methane detection at 1670-nm band using a hollow-core photonic bandgap fiber and a multiline algorithm," *Optics Express* 15(26), 17570-17576 (2007).
 - [3] Mosely, P.T., Norris, J.O.W., and Williams, D.E., [Techniques and Mechanisms in Gas Sensing], Adam Hilger, Bristol, 234-259 (1991).
 - [4] Sun, J., and Huang L., "Single-longitudinal-mode fiber ring laser using internal lasing injection and self-injection feedback," *Optical Engineering* 46(7), 074201-6 (2007).
 - [5] Quintela, M.A., Perez-Herrera, R.A., Canales, I., Fernandez-Vallejo, M., Lopez-Amo, M., and Lopez-Higuera, J.M., "Stabilization of dual-wavelength erbium doped ring fiber lasers by single-mode operation", *IEEE Photonics Technology Letters* 22(6), 368-370 (2010).
 - [6] Perez-Herrera, R.A., Quintela, M.A., Fernandez-Vallejo, M., Quintela, A., Lopez-Amo M., and Lopez-Higuera, J.M., "Stability comparison of two ring resonator structures for multiwavelength fiber lasers using highly doped Er-fibers", *IEEE Journal of Lightwave Technology* 27(14), 2563-2569 (2009).
 - [7] Diaz, S., Abad, S., and Lopez-Amo, M., "Fiber optic sensor active networking with distributed erbium doped fiber and Raman amplification," *Laser & Photonics Reviews* 2(6), 480-497 (2008).
- http://www.stats.gla.ac.uk/steps/glossary/confidence_intervals.html